

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté des sciences appliquées  
Département de génie civil

UTILISATION D'UN RÉSIDU MINIER (OPP) DANS LES BÉTONS COMPACTÉS AU  
ROULEAU POUR BARRAGES

Mémoire de maîtrise es sciences appliquées  
Spécialité: génie civil

Danielle Martin

## RÉSUMÉ

---

Ce travail de recherche a pour objectif d'étudier la possibilité d'utiliser un résidu minier (OPP), produit par la compagnie QIT Fer et Titane du Québec, dans les bétons compactés au rouleau (BCR) pour barrages en remplacement des cendres volantes qui sont employées à l'heure actuelle.

Dans un premier temps cette étude présente les caractéristiques des BCR: les dosages et matériaux employés, les propriétés physico-mécaniques et autres particularités des BCR. Par la suite, elle fournit un aperçu des différentes méthodes de formulation et des techniques de fabrication des éprouvettes de BCR.

Le programme expérimental de cette étude a pour objectif d'analyser l'effet de la variation de la quantité de liant, du rapport eau/liant et du pourcentage de remplacement du ciment par de l'OPP sur les propriétés du béton frais et du béton durci. Également, on vise à valider une nouvelle approche de formulation des BCR basée sur la théorie des plans d'expérience.

Une première série d'essais a porté sur 10 BCR dont on a varié la teneur en liant, le rapport eau/liant et la teneur en OPP à l'intérieur des limites suivantes: 170 à 200 kg/m<sup>3</sup>; 0,60 à 0,80; 40% à 60% (remplacement du ciment). Ces BCR ont été produits dans le but de vérifier la possibilité de produire un BCR dont la maniabilité, la résistance à la compression, la résistance à la traction, le dégagement de chaleur et la perméabilité à l'eau répondent aux exigences d'Hydro-Québec.

Une deuxième série d'essais a servi à étudier l'entraînement d'air dans les BCR. Quatre BCR ont été fabriqués à partir des deux premiers BCR de la série 1. Le dosage en agent entraîneur d'air (AEA) a varié de façon à déterminer son effet sur les propriétés des BCR plus ou moins maniables. Plus précisément, on a cherché à vérifier l'influence du dosage en AEA sur la quantité d'air entraîné, la maniabilité et la résistance à la compression.

Le programme expérimental comporte aussi un essai de production en usine et la construction d'une planche d'essai pour évaluer la possibilité de produire des BCR avec OPP et pour vérifier leurs propriétés dans des conditions in-situ.

L'analyse des résultats obtenus a permis de montrer qu'il est possible d'utiliser l'OPP dans la fabrication de BCR pour barrages au lieu des cendres volantes. Ainsi, un BCR contenant 40% d'OPP en remplacement du ciment a des propriétés semblables à un BCR contenant 50% de cendres volantes en remplacement du ciment. Cette recherche a également montré qu'il est relativement facile d'entraîner de l'air dans les BCR avec OPP. Par ailleurs, afin de profiter au maximum des avantages de l'utilisation d'air entraîné dans le BCR, il est préférable de partir d'une formulation qui donne un mélange assez sec, c'est-à-dire, d'un BCR dont le temps Vebe est supérieur à 45 s.

## REMERCIEMENTS

---

Je désire tout d'abord remercier les membres de ma famille, spécialement mes parents, pour le soutien moral et financier qu'ils m'ont apporté tout au long de mes études. Également, mon directeur de recherche M. Richard Gagné pour ses conseils judicieux, son savoir et ses encouragements. Également, je voudrais remercier Hydro-Québec et QIT Fer et Titane pour avoir supporté et financé ce projet; plus particulièrement M. Alain Prézeau, Mme Marie-Josée Nolet et M. Salustio Guzman.

Je remercie aussi tout le personnel du groupe béton pour sa collaboration à l'avancement de mes travaux. Particulièrement à M. Claude Faucher qui a su fabriquer et réparer les équipements nécessaires; ainsi que M. Sylvain Roy, M. Mario Rodrigue et M. Jean-Yves Roy pour leur aide lors des divers essais effectués en laboratoire et en usine. Merci aussi à Philippe, Julie et Serge de m'avoir prêté leurs bras et leur temps.

Finalement, je remercie mes amis et ma tendre moitié de m'avoir supportée, motivée ou simplement changé les idées au bon moment; ainsi que pour leur présence en tout temps.

merci encore...



## TABLE DES MATIÈRES

---

	Page
1.0 INTRODUCTION .....	1
2.0 LE BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU .....	3
2.1 Matériaux et dosages .....	4
2.1.1 Granulats .....	4
2.1.2 Liants .....	5
2.1.3 Fillers .....	6
2.1.4 Eau .....	7
2.1.5 Autres constituants .....	8
2.2 Propriétés physico-mécaniques .....	9
2.2.1 Résistance à la compression .....	9
2.2.2 Résistance à la traction .....	10
2.2.3 Résistance au cisaillement inter-couches .....	11
2.2.4 Perméabilité .....	12
2.2.5 Durabilité .....	13
2.3 Entraînement d'air .....	15
3.0 FORMULATION D'UN BCR ET TECHNIQUES DE FABRICATION EN LABORATOIRE .....	17
3.1 Méthodes de formulation .....	17
3.1.1 Méthode des BCR pauvres en liant .....	18
3.1.2 Méthode simplifiée de l'approche sols .....	20
3.1.3 Méthode des BCR riches en liant .....	21
3.1.4 Méthode japonaise (RCD) .....	22
3.1.5 Méthode du US Army Corps of Engineers .....	24
3.1.6 Méthode détaillée de l'approche béton .....	25
3.2 Fabrication des éprouvettes .....	29
3.2.1 Spécimens compactés par impact .....	30
3.2.2 Spécimens vibrés .....	30
3.2.3 Spécimens damés .....	31
4.0 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS .....	33
4.1 Objectifs de la recherche .....	33
4.2 Programme des essais .....	34

5.0 MATÉRIAUX ET OPÉRATIONS .....	37
5.1 Matériaux .....	37
5.1.1 Ciment .....	37
5.1.2 Granulats .....	38
5.1.3 Adjuvants .....	40
5.1.4 OPP .....	41
5.1.5 Eau de gâchage .....	44
5.2 Mélanges et procédures de gâchage.....	45
5.2.1 Mélanges de BCR .....	45
5.2.2 Procédures de gâchage .....	47
5.2.3 Fabrication, démoulage et technique de cure des éprouvettes .....	48
5.3 Essais sur le béton frais .....	49
5.3.1 Temps Vebe et masse volumique .....	49
5.3.2 Teneur en air .....	49
5.4 Essais sur le béton durci .....	50
5.4.1 Dégagement de chaleur .....	50
5.4.2 Résistance à la compression .....	50
5.4.3 Résistance à la traction .....	50
5.4.4 Perméabilité à l'eau .....	50
6.0 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS .....	52
6.1 Mélanges du plan factoriel (série 1) .....	52
6.1.1 Temps Vebe .....	52
6.1.2 Dégagement de chaleur .....	54
6.1.3 Résistance à la compression .....	56
6.1.4 Résistance à la traction .....	59
6.1.5 Perméabilité à l'eau .....	61
6.1.6 Résultats de l'analyse factorielle .....	63
A) Le temps Vebe .....	64
B) Résistance à la compression .....	65
C) Résistance à la traction .....	67
6.2 Mélanges avec air entraîné (série 2) .....	69
6.2.1 Entraînement d'air .....	69
6.2.2 Temps Vebe .....	70
6.2.3 Résistance à la compression .....	72
6.3 Essai pilote .....	74

<b>7.0 DISCUSSION .....</b>	<b>76</b>
7.1 Utilisation du plan factoriel pour la formulation des BCR .....	76
7.2 Utilisation de L'OPP en remplacement des cendres volantes .....	77
7.2.1 Propriétés du béton frais .....	77
7.2.2 Propriétés du béton durci .....	77
7.3 Entraînement d'air dans les BCR avec OPP .....	78
 <b>CONCLUSION .....</b>	 <b>79</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>81</b>
<b>ANNEXE A COURBES DE DÉGAGEMENT DE CHALEUR .....</b>	<b>83</b>
<b>ANNEXE B ANALYSE FACTORIELLE .....</b>	<b>92</b>

## LISTE DES FIGURES

---

	Page
2.1 Densité sèche et résistance à la compression en fonction du pourcentage d'humidité .....	10
3.1 Fuseau granulométrique du BCR .....	19
3.2 Courbes de formulation pour une résistance à la compression voulue .....	22
3.3 Relation entre la teneur en liant et la résistance à la compression pour le barrage Tamagama .....	23
3.4 Résistance à la compression en fonction du rapport eau/ciment .....	26
4.1 Cube représentatif des mélanges du plan factoriel .....	35
4.2 Schéma de la planche d'essai .....	36
5.1 Courbe granulométrique du ciment .....	37
5.2 Courbe granulométrique combinée .....	40
5.3 Courbe granulométrique de l'OPP .....	42
5.4 Diffractogramme (DRX) des fines de l'OPP .....	43
5.5 Particule anguleuse de 100 $\mu\text{m}$ .....	43
5.6 Agglomération de particules de 5 $\mu\text{m}$ et moins .....	44
5.7 Schéma d'une cellule pour l'essai de perméabilité à l'eau .....	51
6.1 Temps Vebe en fonction de $V_p/V_{vc}$ .....	54
6.2 Élévation de température en fonction de la teneur en ciment .....	56
6.3 Résistance à la compression à 91 jours en fonction du rapport E/C .....	58
6.4 Résistance à la compression à 91 jours en fonction du rapport E/L .....	58
6.5 Augmentation de la résistance à la compression entre 28 et 91 jours .....	59
6.6 Résistance à la traction à 91 jours en fonction du rapport E/L .....	61
6.7 Résistance à la traction à 91 jours en fonction du rapport E/C .....	61
6.8 Perméabilité à l'eau à 91 jours en fonction de la résistance à la compression .....	63
6.9 Isoréponses - temps Vebe .....	65
6.10 Isoréponses - $f_c$ .....	66
6.11 Isoréponses - $Tr$ .....	68
6.12 Air entraîné en fonction du dosage en AEA .....	70
6.13 Effet du pourcentage d'air entraîné sur le temps Vebe .....	71
6.14 Temps Vebe en fonction de $V_p/V_{vc}$ et $V_{pa}/V_{vc}$ .....	72
6.15 Influence du pourcentage d'air sur la résistance à la compression à 91 jours .....	73

## LISTE DES TABLEAUX

	Page
2.1 Propriétés du béton conventionnel et du BCR.....	3
2.2 Volume de gros granulats pour un diamètre maximum donné.....	5
3.1 Teneurs maximales en particules fines .....	24
3.2 Quantité d'eau et d'air pour des BCR de différents $\phi_{\max}$ .....	27
3.3 Granulométrie des granulats pour BCR .....	28
3.4 Quantités de sable et de mortier pour des BCR de différents $\phi_{\max}$ .....	28
3.5 Caractéristiques des appareils de compactage.....	31
4.1 Plan factoriel.....	34
4.2 Mélanges série 2 .....	35
5.1 Composition de Bogue du ciment .....	38
5.2 Caractéristiques physico-chimiques du ciment .....	38
5.3 Granulométrie du sable et de la criblure.....	39
5.4 Granulométrie du gros granulat.....	40
5.5 Composition chimique de l'OPP.....	41
5.6 Mélanges série 1 .....	45
5.7 Mélanges série 2 .....	46
5.8 Caractéristiques du BCR produit en usine.....	46
6.1 Temps Vebe (série 1).....	53
6.2 Dégagement de chaleur.....	55
6.3 Résistances à la compression (série 1) .....	57
6.4 Résistances à la traction (série 1) .....	60
6.5 Perméabilité à l'eau des mélanges de la série 1 .....	62
6.6 Valeurs estimées et valeurs mesurées - temps Vebe.....	65
6.7 Valeurs estimées et valeurs mesurées - $f_c$ .....	67
6.8 Valeurs estimées et valeurs mesurées - $Tr$ .....	68
6.9 Pourcentage d'air des mélanges (série 2) .....	69
6.10 Temps Vebe (série 2).....	71
6.11 Résistance à la compression (série 2).....	73
6.12 Résistance à la compression des cylindres carottés .....	75
6.13 Résistance à la compression des cylindres moulés.....	75

## LISTE DES SYMBOLES

---

$\alpha$	Surface spécifique ( $\text{mm}^{-1}$ )
E/C	Rapport eau/ciment (massique)
E/L	Rapport eau/liant (massique)
$\phi_{\text{max}}$	Diamètre maximum (mm)
$f_c$	Résistance à la compression (MPa)
$K_{\text{eau}}$	Perméabilité à l'eau (m/s)
$\bar{L}$	Facteur d'espacement ( $\mu\text{m}$ )
$T_{\text{max}}$	Température maximum ( $^{\circ}\text{C}$ )
Tr	Résistance à la traction par écrasement latéral (MPa)
$V_p$	Volume de pâte sans air ( $\text{L}/\text{m}^3$ )
$V_{pa}$	Volume de pâte comprenant l'air entraîné ( $\text{L}/\text{m}^3$ )
$V_{vc}$	Volume des vides de compactage du mélange granulaire ( $\text{L}/\text{m}^3$ ) ou (%)

## 1.0 INTRODUCTION

L'augmentation des coûts reliés à la construction de barrages en béton lors des trente dernières années, a poussé les concepteurs de barrages à trouver des alternatives. Les barrages en enrochement nécessitant beaucoup de matériaux fins afin d'assurer leur étanchéité, ne présentent pas toujours une solution envisageable. Graduellement on a donc développé un nouveau matériau, le BCR, qui réunit les avantages des enrochements (économie, rapidité et facilité de mise en place) et des bétons conventionnels (durabilité, imperméabilité, propriétés mécaniques).

Jusqu'à aujourd'hui, des centaines de barrages en BCR ont été construits à travers le monde. Par souci d'économie et afin de limiter le dégagement de chaleur dans les barrages, les pouzzolanes sont de plus en plus employées en remplacement du ciment dans ces ouvrages. Parmi les différents produits disponibles, les plus utilisés sont certainement les cendres volantes, qui présentent certaines caractéristiques qui les rendent particulièrement intéressantes. Cependant, pour Hydro-Québec, l'emploi de cendres volantes dans les barrages en BCR n'est pas toujours avantageux. N'étant pas disponibles au Québec, il faut faire venir les cendres volantes de Nouvelle-Écosse ou des États-Unis. Les coûts reliés au transport sont relativement élevés et font en sorte que le prix des cendres volantes livrées au chantier est souvent égal ou légèrement supérieur à celui du ciment.

Par ailleurs, la compagnie QIT Fer et Titane du Québec récupère de ses opérations de Sorel un sous-produit issu du traitement de l'ilménite qui est nommé OPP (ore pretreatment plant fines). Les coûts d'entreposage élevés incitent QIT à valoriser l'emploi de l'OPP dans des applications industrielles. L'OPP est une poudre de granulométrie semblable à celle du ciment, qui est légèrement pouzzolanique. Il est donc envisageable de l'utiliser dans les BCR en remplacement des cendres volantes actuellement employées.

Dans le cadre de cette recherche, nous étudierons donc la possibilité d'employer de l'OPP en remplacement des cendres volantes pour fabriquer des BCR. Nous verrons, entre autres, l'effet du pourcentage de remplacement en OPP sur les propriétés du béton frais et du béton durci. Une

variation de la teneur en liant des mélanges et du rapport E/L seront également étudiés. De plus, puisque les méthodes de formulation des BCR actuellement disponibles sont assez longues et coûteuses, car elles demandent la préparation de plusieurs mélanges d'essai, nous avons envisagé d'essayer une nouvelle approche. Cette approche, plus rigoureuse et plus systématique, est basée sur la théorie des plans d'expériences. Elle permet notamment de bâtir un modèle de prédiction de la maniabilité, de la résistance à la compression et à la traction, de la perméabilité et de la température maximale d'hydratation, des BCR avec OPP, en fonction de leurs principaux paramètres de formulation.

De façon à mieux amorcer les travaux de recherche, une revue de la littérature en deux parties est présentée dans les pages suivantes. Le chapitre 2 porte sur le BCR en général, ses caractéristiques et propriétés. Il est, entre autres, question des matériaux et dosages utilisés et des propriétés physico-mécaniques propres au BCR. Une section portant sur l'entraînement d'air est également présentée dans ce chapitre. Le chapitre 3 porte, quant à lui, sur les méthodes de formulation des BCR et sur les techniques de fabrication en laboratoire.

Par la suite, les objectifs et le programme des essais de la recherche sont présentés au chapitre 4. Les matériaux utilisés et les opérations effectuées en laboratoire sont décrits au chapitre 5. Pour ce qui est du chapitre 6, on y présente les résultats de la recherche. Ces résultats sont ensuite discutés au chapitre 7.



## 2.0 LE BÉTON COMPACTÉ AU ROULEAU

Le béton compacté au rouleau se distingue du béton conventionnel par sa faible teneur en matières cimentaires, son affaissement nul et sa méthode de mise en place. En effet, vu sa consistance, ce béton est mis en place à l'aide d'engins classiques de terrassement et nécessite peu ou pas de coffrages. Au cours des années, deux approches de formulation des BCR ont été développées: l'approche sols et l'approche béton.

Selon l'approche sols, le BCR est considéré comme un mélange de granulats enrichi de ciment. La faible quantité de liant utilisée conformément à cette approche a pour conséquence de laisser des vides non remplis par la pâte après compaction. Les BCR incorporant moins de  $120 \text{ kg/m}^3$  de liant font partie de cette catégorie. Un dosage supérieur à  $120 \text{ kg/m}^3$  de liant permet généralement de remplir tous les vides intergranulaires pour ainsi obtenir un matériau pleinement consolidé après compaction. C'est-à-dire que l'on se retrouve avec un matériau dont les propriétés sont surtout influencées par le rapport E/C. C'est pourquoi les mélanges ayant plus de  $120 \text{ kg/m}^3$  de liant sont considérés comme des mélanges riches auxquels on peut appliquer l'approche béton. Quelle que soit l'approche préconisée, la quantité de pâte dans le BCR représente généralement de 18% à 22% du volume absolu (13% à 15% en masse) [SHRADER, 1994].

Vu leur formulation particulière, les BCR se différencient des bétons conventionnels de par leurs propriétés à l'état frais ainsi que leur microstructure. Les principales différences sont présentées au tableau 2.1.

TABLEAU 2.1 - PROPRIÉTÉS DU BÉTON CONVENTIONNEL ET DU BCR

BCR	Béton
<ul style="list-style-type: none"><li>• très fine couche de pâte autour des granulats</li><li>• structure dense, non homogène</li><li>• présence de vides de compactage</li><li>• mélange visqueux sans affaissement</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• granulats bien enrobés de pâte de ciment</li><li>• pâte homogène</li><li>• ciment, hydrates et capillaires bien répartis</li><li>• même sans air entraîné il y a présence d'air occlus bien dispersé dans la matrice</li></ul>

## **2.1 Matériaux et dosages**

Quelle que soit l'approche choisie pour la formulation du mélange, les matériaux employés dans le BCR sont les mêmes que pour le béton conventionnel. Cependant, les dosages peuvent varier et une attention particulière est apportée à la granulométrie afin d'assurer une bonne mise en place ainsi que des propriétés physiques et mécaniques satisfaisantes.

### **2.1.1 Granulats**

Il faut apporter une attention particulière au squelette granulaire des BCR vu la faible quantité de liant qu'ils contiennent. Le but est de réduire le plus possible les vides intergranulaires afin d'éviter qu'il y ait de la ségrégation ou qu'il subsiste trop de vides après le compactage. Pour atténuer les risques de ségrégation on limite en général le gros granulat à un diamètre de 75 mm lors de la construction des barrages et à 22 mm pour les routes [DELAGRAVE, 1992].

Les granulats employés dans les BCR peuvent provenir de sources naturelles ou encore être concassés. Les granulats naturels (surface lisse) ont l'avantage de demander moins d'eau pour une consistance donnée et donnent un béton plus facile à compacter que les granulats concassés [ANDERSSON, 1987]. Par contre, il y a plus de risque de ségrégation avec l'emploi de granulats naturels. Bien sur, il est possible d'utiliser des granulats naturels et des granulats concassés en combinaison afin de profiter des avantages des deux types de granulats.

Le dosage en granulats pour un BCR est plus élevé que pour un béton conventionnel. En général, le granulat fin ( $< 5$  mm) représente entre 35% et 50% en masse des granulats ce qui est légèrement supérieur à ce qui est typiquement employé dans un béton conventionnel [ACI, 1989]. Les granulats fins servent particulièrement à augmenter la densité du mélange granulaire et à améliorer la maniabilité du béton frais. Également, une plus grande quantité de granulats fins permet de réduire la ségrégation et de limiter le bris des granulats lors de la compaction. Le rapport 207.5R de l'ACI présente certaines recommandations concernant le volume de gros

granulats à utiliser (par rapport au mélange total) pour faciliter les opérations de mise en place. Ces valeurs sont montrées au tableau 2.2.

TABLEAU 2.2 - VOLUME DE GROS GRANULATS POUR UN DIAMÈTRE MAXIMUM DONNÉ

$\phi_{\max}$ gros granulat	6"	4 1/2"	3"	1 1/2"	3/4"	3/8"
volume (%)	63	61-63	57-61	52-57	46-52	42-48

### 2.1.2 Liants

Il est possible d'utiliser tous les types de ciments dans le BCR comme dans les bétons conventionnels. Cependant on remarque que pour la construction routière le ciment Type 10 est privilégié car il offre des délais de prise raisonnables et des dégagements de chaleur admissibles pour ce type d'ouvrage. Pour les barrages, le dégagement de chaleur doit être contrôlé précisément étant donné le volume important de béton mis en place et le risque de fissuration associé à ce dégagement de chaleur. C'est pourquoi on emploie plus souvent du ciment Type 20 à faible chaleur d'hydratation.

Il est aussi possible d'utiliser d'autres types de liants comme les cendres volantes, la fumée de silice, les laitiers de haut fourneau, etc. en remplacement du ciment et ce, en quantité plus ou moins importante. Au barrage des Olivettes (France) on a même employé un mélange sans ciment contenant  $130 \text{ kg/m}^3$  de laitier de haut fourneau et de cendres volantes [BOUYGE et coll., 1988]. Les faibles résistances en compression requises dans les barrages permettent d'utiliser ce type de liant qui a comme avantage de réduire considérablement l'élévation de température dans les ouvrages à cause de leur faible réactivité initiale. De plus, il est recommandé de remplacer une partie du ciment par des particules fines possédant des propriétés pouzzolaniques. Ces produits permettent de réduire le dégagement de chaleur de même que les coûts de l'ouvrage tout en fournissant une plus grande maniabilité lors de la mise en place.

Comme nous l'avons vu précédemment, le dosage en liant d'un BCR varie de moins de  $120 \text{ kg/m}^3$  pour l'approche sols à plus de  $120 \text{ kg/m}^3$  pour les mélanges riches de l'approche béton. HOLLINGWORTH et coll. [1988] ont cependant constaté qu'une teneur en liant de moins de  $100 \text{ kg/m}^3$  rendait le béton difficilement compactable. Ces mélanges demandent également un plus grand rapport E/L pour obtenir une bonne compacité et pour développer un lien adéquat entre deux couches successives de béton. La tendance actuelle est donc d'augmenter la quantité de liant (et le pourcentage de cendres volantes ou autre pouzzolane) afin d'améliorer l'ouvrabilité du béton et l'imperméabilité des barrages.

### 2.1.3 Fillers

Pour les bétons conventionnels, il est bien connu qu'une quantité trop élevée de particules fines est nuisible car elle augmente la demande en eau et diminue les caractéristiques mécaniques du béton. Par contre, dans un BCR, un pourcentage plus élevé de particules passant le tamis  $80 \mu\text{m}$  (#200) est favorable car ces particules contribuent à combler les espaces intergranulaires [HANSEN et coll., 1991]. Ainsi, en utilisant une plus grande quantité de particules fines, on peut diminuer la quantité de liant tout en maintenant une maniabilité acceptable.

Dans les BCR, on emploie souvent des substances pouzzolaniques pour jouer le rôle de filler dans les bétons. Ces substances, qui s'hydratent plus lentement que le ciment, permettent donc de diminuer l'augmentation de chaleur dans le béton tout en améliorant sa maniabilité et sa compacité. À court terme on obtient des résistances assez faibles. Cependant, puisque la maniabilité et la compaction sont améliorées on peut baisser le rapport E/L et ainsi compenser pour cette perte. Les principaux fillers pouzzolaniques utilisés dans les BCR sont les cendres volantes, les fumées de silice et les laitiers de haut fourneau. Les taux de remplacement varient énormément d'un barrage à l'autre. Cependant, pour les mélanges de moins de  $120 \text{ kg/m}^3$  de liant on se limite généralement à moins de 40% de pouzzolanes. Pour les mélanges plus riches, par contre, on retrouve jusqu'à 70% de remplacement dans certains barrages [HANSEN et coll., 1991].

HAQUE et coll. [1986] mentionnent qu'on peut utiliser sans problème jusqu'à 15% (en masse du mélange) de particules passant le tamis 80  $\mu\text{m}$  (#200) dans les BCR. D'autres chercheurs préconisent plutôt un pourcentage maximum d'environ 10 ou 12%. Cependant, DELAGRAVE [1992] et ARJOUAN et coll. [1988] constatent que les meilleurs résultats sont obtenus lorsqu'il y a de 6 à 8% de particules fines dans le mélange car dans cette plage de valeurs la teneur en eau du mélange a moins d'influence sur la densité maximale.

#### 2.1.4 Eau

Pour le BCR comme pour le béton conventionnel, la quantité d'eau employée a une grande influence sur les propriétés du béton. Par contre, alors que pour les bétons conventionnels on cherche constamment à réduire le rapport E/C pour obtenir de plus grandes résistances, dans les BCR on cherche plutôt à fournir suffisamment d'eau pour humidifier toutes les particules fines (incluant le ciment, les cendres volantes et les particules fines des granulats) [SHRADER, 1982]. Ainsi, les particules fines adhéreront et recouvriront uniformément les plus gros granulats.

Alors que pour un béton conventionnel la quantité d'eau employée dans le mélange est gouvernée par le rapport E/C, dans les BCR ce sont les essais de compaction qui sont déterminants. Un manque d'eau donnera un béton plutôt sec, difficile à compacter pour atteindre la densité maximum, alors qu'un excès d'eau donnera un béton trop fluide pour être compacté. La compaction idéale est produite lorsque le mélange est le plus humide possible tout en pouvant supporter la charge d'un rouleau compacteur [SHRADER, 1982].

On visera selon l'approche sols, une composition du béton qui donne une courbe OPM (Optimum Proctor Modifié) peu prononcée afin de limiter les effets d'un changement du pourcentage d'eau qui sont inévitables en chantier. Pour les bétons riches, la quantité d'eau à utiliser est déterminée à l'aide d'un appareil Vebe (mesure de la consistance). Les dosages en eau typiques pour les BCR sont de 90 à 120  $\text{kg/m}^3$  [HANSEN et coll., 1991] et le rapport E/C aux alentours ou même supérieur à 1,0 [SHRADER, 1982].

### 2.1.5 Autres constituants

Depuis que l'on utilise du béton dans la construction, on a cherché à améliorer ses propriétés rhéologiques et mécaniques ainsi qu'à diminuer les coûts qui s'y rattachent. C'est pourquoi on utilise des produits comme les réducteurs d'eau, les retardateurs de prise et les agents entraîneurs d'air. Les réducteurs d'eau sont employés afin d'améliorer la maniabilité et la compactabilité en rendant le mélange plus homogène et fluide [CANNON, 1993]. Les réducteurs d'eau entraînent à un certain degré de l'air dans les bétons conventionnels mais généralement on retrouve cet air sous forme de grosses bulles instables [CANNON, 1993]. Ils peuvent aussi parfois retarder la prise du béton.

Les retardateurs de prise, quant à eux, servent surtout à éviter les joints froids qui pourraient se former entre deux applications de béton et à éviter une prise prématurée. Pour ce qui est des entraîneurs d'air, plusieurs essais ont été faits et souvent il s'avère difficile ou même impossible d'entraîner de l'air dans les BCR et ce, même en utilisant des dosages très élevés en agent entraîneur d'air [HANSEN et coll., 1991; SHRADER, 1982]. Il faut également porter une attention particulière aux problèmes de compatibilité entre les différents adjuvants car les concentrations sont élevées vu la faible quantité d'eau dans les mélanges et les dosages élevés en adjuvants.

## **2.2 Propriétés physico-mécaniques**

La formulation des bétons compactés au rouleau est surtout basée sur les propriétés du béton frais mais il faut aussi s'assurer que le béton durci présentera également des propriétés satisfaisantes.

### 2.2.1 Résistance à la compression

Comme pour un béton conventionnel, la qualité des matériaux utilisés dans le béton compacté au rouleau a une grande influence sur les résultats obtenus. Mais le facteur qui affecte le plus la résistance en compression demeure la quantité de liant présente dans le mélange. Un mélange riche en liant aura une plus grande résistance en compression qu'un béton fait avec les mêmes granulats mais contenant une plus faible quantité de liant. Les BCR employés dans les barrages ont en général des résistances comprises entre 15 et 25 MPa (à 91 jours) car dans la grande majorité des cas ce sont des barrages poids qui sont construits. Or, pour ces barrages le facteur le plus important est la masse du béton et non sa résistance. Cependant, puisque la formulation du BCR se fait selon les besoins particuliers à chaque projet il est possible de rencontrer des résistances inférieures ou supérieures à ces valeurs.

Selon l'approche sols on emploie la relation %humidité-densité pour évaluer la résistance en compression. En effet, il y a corrélation entre la densité du BCR et sa résistance. Ainsi, au point de densité maximum on aura également la résistance maximum. Ce fait est bien montré à la figure 2.1.

Pour l'approche béton on se sert plutôt du rapport E/C pour évaluer la résistance à la compression. Puisque le BCR est considéré comme un béton, la résistance augmente lorsque le rapport E/C diminue. Les particules fines augmentent la résistance à la compression des BCR faibles en liant mais elles peuvent avoir l'effet contraire sur les mélanges riches en matières cimentaires [SHRADER, 1994]. De plus, la qualité et la composition des matières cimentaires

ont une grande influence sur le développement de la résistance et la valeur finale atteinte. Le niveau de compaction est également un facteur influençant la résistance en compression. Plus un BCR est compacté, plus il sera dense et permettra d'atteindre des résistances élevées. En ces points les deux approches se rejoignent [HANSEN et coll., 1991]. Par ailleurs, lors d'une étude comparative, TAYABJI et coll. [(s.d.)] ont trouvé que les cylindres confectionnés en laboratoire surestiment la résistance à la compression des ouvrages.

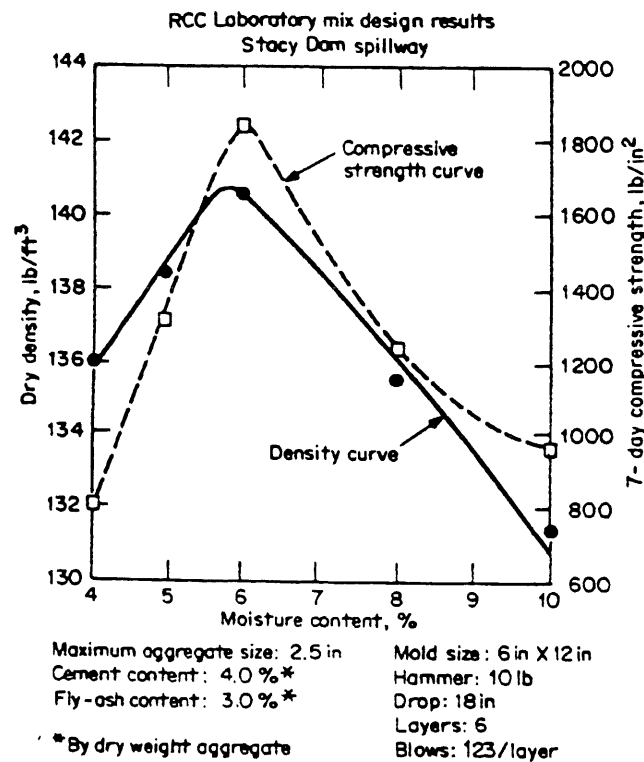


Figure 2.1 Densité sèche et résistance à la compression en fonction du pourcentage d'humidité

### 2.2.2 Résistance à la traction

La résistance à la traction du béton dépend principalement de l'adhérence entre le mortier et les granulats. Il est possible d'améliorer la résistance en utilisant des granulats concassés ou à surface rugueuse. Dès 1964, DEWAR constatait que les bétons contenant des granulats concassés présentaient des résistances à la traction d'environ 8% plus élevées que celles des



bétons contenant des granulats naturels roulés lisses (dans DELAGRAVE, 1992). Pour les bétons basés sur l'approche sols, la résistance à la traction est généralement d'environ 0,5 MPa alors que pour les mélanges plus riches elle varie de 1,5 à 2,5 MPa [DUNSTAN, 1988]. Par ailleurs, TAYABJI et coll. [(s.d.)] ont montré que, contrairement à la résistance à la compression, les cylindres confectionnés en laboratoire sous-évaluent la résistance à la traction des ouvrages. Comme pour les bétons conventionnels, une plus grande teneur en liant, une plus faible teneur en eau et l'emploi de granulats concassés tendent à augmenter la résistance à la traction des BCR. De plus, le rapport entre la résistance à la traction et la résistance à la compression des mélanges riches en liant est plus faible que celui des mélanges pauvres en liant [SHRADER, 1994].

### 2.2.3 Résistance au cisaillement inter-couches

Pour les barrages, il est particulièrement important d'obtenir un bon lien entre les couches de béton afin d'assurer la stabilité des ouvrages et leur étanchéité. Plusieurs précautions peuvent être prises pour obtenir des valeurs de résistance inter-couches satisfaisantes. Par exemple, on peut augmenter la quantité de liant dans le mélange, limiter le temps entre deux placements de béton ou encore utiliser un mortier de liaison. DUNSTAN [1988] a observé que la résistance au cisaillement obtenue pour des éprouvettes où on a utilisé un mortier de liaison est la même que celle des éprouvettes sans mortier de liaison.

Des valeurs de résistance au cisaillement inter-couches de 0,5 à 1 MPa sont généralement obtenues pour les bétons maigres et de 2 à 4 MPa pour les bétons riches en liant [DUNSTAN, 1988]. On peut aussi estimer la résistance en cisaillement des BCR : pour les mélanges de résistance supérieure à 17 MPa (2500 psi) celle-ci est de  $0,1f_c$  à  $0,2f_c$ ; pour des résistances d'environ 14 MPa (2000 psi) elle est de  $0,15f_c$  à  $0,25f_c$  et pour des BCR d'environ 7 MPa (1000 psi) elle est de  $0,25f_c$  à  $0,3f_c$  [SHRADER, 1994]. La résistance au cisaillement dépend de multiples facteurs dont la consistance du béton; les caractéristiques des granulats; le degré de compaction; la teneur en liant; le temps entre le bétonnage de deux couches ainsi que du traitement et de la condition des surfaces de béton.

#### 2.2.4 Perméabilité

Dans le contexte des barrages, la perméabilité joue un rôle crucial dans le contrôle des fuites et de la détérioration due aux cycles de gel-dégel. Deux niveaux de perméabilité sont à considérer, soit: la perméabilité du BCR en tant que matériau et la perméabilité de l'ouvrage en tant que tel. Jusqu'ici il a été démontré que le BCR est plus perméable que le béton conventionnel. En effet, on doit s'attendre à des coefficients de perméabilité d'environ  $10^{-11}$  à  $10^{-12}$  m/s pour les BCR [BANTHIA et coll., 1992; SHRADER, 1988] alors que pour les bétons conventionnels avec un rapport E/C de 0,50 on obtient environ  $10^{-14}$  m/s. Pour les bétons maigres en ciment (60 à 100 kg/m<sup>3</sup>) cette valeur peut être aussi grande que  $10^{-4}$  m/s. Pour diminuer la perméabilité du BCR on doit essentiellement utiliser une plus grande quantité de liant dans le mélange. Ainsi, DUNSTAN [1988] constate que plus il y a de liant dans un mélange de BCR, plus le coefficient de perméabilité in-situ des barrages est faible. Le US Bureau of Reclamation fixe la valeur du coefficient de perméabilité in-situ minimal acceptable à  $1,5 \times 10^{-7}$  m/s pour un barrage. SHRADER [1985] (dans DELAGRAVE, 1992) suggère, quant à lui, des coefficients allant de  $1,5 \times 10^{-12}$  à  $1,5 \times 10^{-10}$  m/s, ces valeurs étant obtenues sur des cylindres de BCR testés en laboratoire.

En Australie, le barrage de Copperfield présentait 4 mois après la fin de la construction des fuites de 24 L/s et à 8 mois les pertes n'étaient plus que de 10 L/s. Au milieu de l'hiver suivant il se développa une fissure verticale dans le barrage et l'écoulement augmenta à 16 L/s pour ensuite redescendre à 5,5 L/s après quelques mois [FORBES, 1988]. On a observé le même phénomène pour d'autres barrages. Ces exemples montrent que suite à l'hydratation et au colmatage à long terme des fissures, l'étanchéité des barrages semble s'améliorer de façon appréciable.

Par ailleurs, BOUYGE [1988] suggère deux options pour améliorer l'étanchéité du corps des barrages. Premièrement, il faut améliorer la qualité des reprises de bétonnage lors de la construction pour ainsi avoir une meilleure étanchéité à l'intérieur de la masse de l'ouvrage. Afin d'atteindre ce but, il est possible de recourir à l'emploi d'un mortier de liaison entre les couches de

variations de températures. Comme deuxième option, il est possible de prendre des dispositions spéciales dans la partie amont du barrage telles que l'emploi de panneaux ou d'éléments préfabriqués ancrés, l'utilisation de membranes et produits synthétiques étanches ou encore de couler un masque de béton conventionnel à l'amont du barrage.

### 2.2.5 Durabilité

On déploie actuellement beaucoup d'efforts à la composition des BCR pour s'assurer d'avoir des propriétés mécaniques et thermiques voulues. Par contre peu de recherches ont été faites au niveau de la durabilité du BCR et plus particulièrement sur l'effet des cycles de gel-dégel. La raison majeure de cet état des choses est que la majorité des barrages en BCR ont moins des 15 ans d'existence et qu'ils sont pour la plupart situés dans des pays où le climat est assez chaud. Il est également difficile de trouver des données sur la résistance à l'érosion, à l'abrasion, et à la fissuration car très peu de recherches ont été faites sur ces sujets.

Puisque la structure interne d'un BCR diffère de celle d'un béton conventionnel, il est difficile de lui appliquer les théories classiques basées sur les propriétés de ce dernier [MARCHAND et coll., 1994]. Par conséquent, il n'est pas toujours facile d'assurer la durabilité aux cycles de gel-dégel des BCR. Pour un béton conventionnel on cherche à diminuer la grosseur des bulles d'air entraîné et l'espacement entre celles-ci afin de réduire les pressions dues à la migration de l'eau lors du gel et ainsi empêcher la fissuration du béton. On juge, pour les bétons conventionnels, que si  $\bar{L} < 250 \mu\text{m}$  et  $\alpha > 25 \text{ mm}^{-1}$ , le béton devrait avoir une bonne résistance aux cycles de gel-dégel. Or, il est très difficile d'entraîner un réseau de bulles d'air dans les BCR car ils contiennent très peu d'eau et de pâte de ciment. On arrive néanmoins à entraîner un faible volume d'air en utilisant des dosages élevés en agent entraîneur d'air et en utilisant des malaxeurs très performants [DELAGRAVE, 1992].

Les études réalisées jusqu'à présent démontrent que les BCR peuvent être résistants aux cycles de gel-dégel même s'ils ne possèdent pas nécessairement un bon réseau de bulles d'air entraîné. Les deux principales raisons qui expliquent ce phénomène sont la plus grande

perméabilité de la pâte des BCR et les nombreux vides de compactage qu'ils contiennent. RAGAN [1986] a montré que les BCR pouvaient résister aux cycles de gel-dégel et que certains vides de compactage agissaient comme des bulles d'air entraîné. Dans le rapport 207.5R de l'ACI sur le BCR de masse, il est mentionné que celui-ci réagit mal à l'essai ASTM C666 procédure A. Par contre les études sur des ouvrages tendent à prouver que le BCR résiste aux conditions naturelles des cycles de gel-dégel mais se détériore lorsqu'exposé à l'eau de mer, aux effets des marées fortes ainsi qu'aux cycles de mouillage-séchage et de gel-dégel combinés.

Pour ce qui est de la résistance à l'abrasion et à l'érosion, il y a peu de données disponibles dans la littérature. La résistance à l'érosion serait proportionnelle à la résistance à la compression alors que la résistance à l'abrasion dépendrait essentiellement des granulats employés. Des essais effectués au barrage de Willow Creek aux États-Unis par le US Corps of Engineers [HANSEN et coll., 1991] ont montré que des panneaux ayant été soumis à des jets d'eau à grande vitesse ont bien résisté. Il ne semble pas y avoir de problème de ce côté, que ce soit pour les BCR faits en laboratoire ou en chantier. Par ailleurs, le contrôle de la fissuration des BCR est satisfaisant à l'heure actuelle. On utilise surtout du ciment Type 20 et des remplacements par des pouzzolanes pour atteindre ce but. Ces moyens permettent de réduire le dégagement de chaleur dans la masse du béton et donc de réduire la fissuration. On peut également diminuer les gradients de température entre l'intérieur de la masse de béton et la surface extérieure pour limiter la fissuration.

## 2.3 Entraînement d'air

Afin d'assurer la durabilité des ouvrages, on entraîne de l'air dans les bétons. Les premiers essais d'entraînement d'air dans les BCR étaient pour le moins décevants. En effet, même avec des dosages allant jusqu'à 10 fois la dose recommandée par le fabricant, il n'était pas possible d'obtenir un bon réseau de bulles d'air; particulièrement lorsque du gravier naturel était employé dans le BCR [SHRADER, 1982] . Ce fût le cas entre autres au Barrage de Willow Creek aux États-Unis. Le peu d'eau disponible pour réagir avec les agents entraîneurs d'air serait une cause des insuccès. Pourtant il a été prouvé que même une faible quantité d'air entraîné était favorable pour la résistance aux cycles de gel-dégel des BCR [DELAGRAVE et coll., 1994] et les recherches s'intensifient dans ce domaine.

Cependant, MARCHAND et coll. [1994] ainsi que GUIRAUD et coll. [1994] ont démontré qu'il est possible d'entraîner de l'air dans les BCR en jouant sur la séquence de malaxage des constituants, le type de malaxeur employé et la sorte d'AEA. En effet, MARCHAND [1992] (dans DELAGRAVE, 1992) propose une séquence de malaxage où on commencerait par mélanger le ciment, l'eau, la moitié des granulats et l'agent entraîneur d'air pour par la suite ajouter le reste des granulats. ANDERSSON [1987] suggère une façon semblable de procéder, avec comme différence l'ajout de superplastifiant avant l'ajout de la deuxième moitié des granulats. Cette séquence de malaxage permettrait d'obtenir une pâte plus homogène ce qui faciliterait l'entraînement d'air.

Par ailleurs, le type de malaxeur utilisé aurait une influence sur l'entraînement d'air. Les malaxeurs qui cisailent les matériaux et créent un vortex seraient plus efficaces que ceux qui font culbuter les matériaux sur eux-mêmes [DELAGRAVE, 1992]. Certains chercheurs affirment aussi que le type d'agent entraîneur d'air, c'est-à-dire sa composition chimique, a également une influence sur l'entraînement d'air dans les BCR [MARCHAND et coll., 1990 (Dans DELAGRAVE et coll.), 1994; WHITING, 1985] mais ce phénomène n'est pas toujours montré dans les expériences [MARCHAND et coll., 1994]. Plusieurs s'entendent également sur le fait qu'utiliser des dosages importants d'agent entraîneur d'air ne permet pas d'entraîner plus de bulles sphériques

mais améliore la compaction en rendant le mélange plus fluide [DELAGRAVE et coll., 1994; CANNON, 1993].

BACKSTROM et coll. [1958] ont montré que plusieurs facteurs influençaient la teneur en air et la distribution granulométrique des bulles dans les bétons conventionnels. Un de ces facteurs est la compaction. Ils ont constaté que la compaction diminuait la teneur en air principalement à cause du mouvement des bulles vers la surface du béton et leur éclatement. Ils ont également constaté que des cylindres compactés en laboratoire subissaient une diminution de la teneur en air et du diamètre moyen des bulles. Par contre, le facteur d'espacement des bulles était relativement constant. Puisque les BCR sont toujours compactés il se pourrait que l'air entraîné lors du malaxage soit en partie perdu lors des opérations de compactage. CANNON [1993], quant à lui, a constaté que le transport et la manutention du BCR causait aussi une diminution de la teneur en air.

Le contrôle du pourcentage d'air est plus difficile pour les BCR que pour les bétons conventionnels car les valeurs obtenues varient souvent d'un mélange à l'autre et même pour un même mélange [CANNON, 1993; MARCHAND et coll., 1992 (dans DELAGRAVE 1992)]. De plus, selon CANNON [1993] la mesure efficace de la quantité d'air entraîné serait limitée aux mélanges de BCR se consolidant en environ 30 s sans surcharge. Des doutes subsistent encore sur ce point. Plusieurs chercheurs questionnent la représentativité des mesures d'air entraîné, sur les BCR, effectuées selon des procédures de normes créées pour les bétons conventionnels.

### 3.0 FORMULATION D'UN BCR ET TECHNIQUES DE FABRICATION EN LABORATOIRE

Plusieurs chercheurs ont publié les résultats obtenus dans divers projets de barrages en BCR. Par contre, on retrouve très peu d'information sur les méthodes de formulation et les techniques de fabrication en laboratoire dans la documentation. Voici néanmoins un aperçu de ce qui est fait en laboratoire pour la préparation des BCR pour barrages.

#### 3.1 Méthodes de formulation

Le principal objectif de la formulation des BCR est de produire un béton qui, tout en utilisant les matériaux disponibles, sera le plus économique possible [TAYABJI et coll., (s.d.)]. Il existe plusieurs méthodes de formulation qui sont applicables aux BCR. Trois de ces méthodes sont décrites dans le rapport 207.5R de l'ACI sur le béton de masse en BCR. Les méthodes décrites s'intitulent: (1) *Proportioning RCC to meet special limits of consistency*, (2) *Trial mixture proportioning for the most economical aggregate/cementitious materials combination*, (3) *Proportioning using soils compaction concepts*. Les méthodes employées par le ministère japonais de la Construction et le US Army Corps of Engineers sont également mentionnées dans ce rapport mais n'y sont pas décrites. Toutes ces méthodes de formulation sont résumées dans le livre *Roller Compacted Concrete Dams* [HANSEN et coll., 1991]. D'ailleurs, les noms identifiant les méthodes dans les pages suivantes sont inspirés de ce document. TATRO et HINDS [1992] proposent également une méthode de formulation détaillée pour les BCR suivant l'approche béton.

Des six méthodes de formulation décrites dans la littérature, deux sont rattachées à l'approche sols alors que les quatre autres sont utilisées pour les BCR de l'approche béton. Il faut se rappeler que les BCR formulés selon l'approche sols sont considérés comme des mélanges granulaires enrichis de matières cimentaires. Les vides granulaires des mélanges formulés selon cette approche ne sont généralement pas remplis par la pâte (eau, ciment, pouzzolanes, air). Le point de départ des deux méthodes décrites plus loin est donc un mélange à granulométrie fixée. Une fois cette étape franchie, on varie la teneur en liant pour obtenir les caractéristiques désirées.

Les deux méthodes de formulation faisant partie de cette catégorie se différencient principalement par la façon dont est déterminée la quantité d'eau qui sera employée dans le mélange. Elles se distinguent également dans la manière de préparer les cylindres en laboratoire.

Par ailleurs, une caractéristique de base des méthodes faisant partie de l'approche béton est que le volume de pâte est plus élevé que le volume des vides des granulats. Une attention particulière est donc apportée au contrôle de la granulométrie afin de minimiser le volume des vides et la quantité de pâte requise. Habituellement on procède en fixant toutes les variables sauf une que l'on fait varier jusqu'à l'obtention de la consistance désirée. Toutes les variables sont passées une après l'autre de cette façon jusqu'à l'obtention du mélange optimal répondant aux exigences. Les proportions des divers constituants sont données en kg par m<sup>3</sup> de béton.

Quelle que soit l'approche choisie, la première étape consiste à identifier les propriétés du BCR qui sont désirées à l'état frais et à l'état durci [HANSEN et coll., 1991]. Une fois les exigences identifiées, il suffit de doser les différents constituants disponibles de façon à répondre le mieux possible aux besoins. Les diverses méthodes décrites dans les pages suivantes fournissent des moyens pour parvenir à ce but.

#### 3.1.1 Méthode des BCR pauvres en liant

Cette méthode est celle qui est la plus utilisée pour les mélanges de l'approche sols. Elle correspond à la méthode (2) de l'ACI. On combine d'abord les granulats pour obtenir une courbe granulométrique la plus lisse possible, de façon économique. La figure 3.1 montre le fuseau granulométrique suggéré pour un BCR par l'ACI.



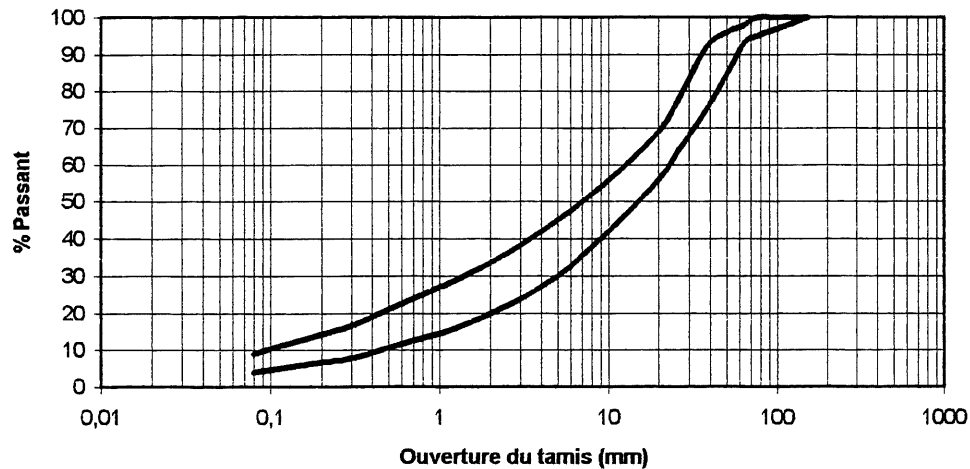


Figure 3.1 Fuseau granulométrique du BCR

On choisit ensuite la quantité d'eau à employer. Cette quantité est déterminée en observant la consistance des mélanges produits et en se basant sur les expériences antérieures. La teneur en eau est choisie de façon à ce qu'elle soit située entre le point où les vides ne sont plus visibles sur les côtés des cylindres (point sec) et où le mélange a une apparence caoutchouteuse (point humide). La teneur en liant est fixe pour ces essais. On fixe la quantité d'eau avant la teneur en matières cimentaires car il a été montré que la teneur en eau choisie est peu ou pas influencée par des changements de la teneur en matières cimentaires, et ce, sur une grande étendue de valeurs [ACI, 1989].

On varie par la suite la teneur en liant de façon à répondre aux exigences du projet, principalement pour ce qui est de la résistance. Les premiers mélanges sont faits sans pouzzolanes. Par la suite, on fait des mélanges contenant une proportion égale de ciment et de pouzzolane. Des mélanges supplémentaires ayant différentes proportions de ciment et de pouzzolane sont ensuite faits afin de déterminer la proportion qui donnera le mélange le plus économique répondant aux exigences.

Les cylindres sont produits en utilisant un dameur pneumatique pour compacter. Cette technique de fabrication des éprouvettes sera vue en détail à la section 3.2.3. Le programme d'essais comprend habituellement des essais à 3, 7, 14, 28, 90, 180 et 365 jours [ACI, 1989].

Deux cylindres sont testés à chacune de ces échéances. S'il n'est pas possible d'attendre pour les longues périodes de temps, on peut évaluer les réponses à partir de courbes tracées avec les valeurs à bas âge. La majorité des mélanges formulés selon cette méthode ont entre 60 et 104 kg/m<sup>3</sup> de matières cimentaires; dans cette quantité on retrouve en général de 25 à 50% de pouzzolanes [HANSEN et coll., 1991].

### 3.1.2 Méthode simplifiée de l'approche sols

Depuis 1960, plusieurs BCR ont été formulés en utilisant les principes de compaction des sols. Cette méthode de formulation est mieux adaptée aux mélanges de BCR contenant des granulats de petite taille ( $\leq 50$  mm) et des teneurs en ciment relativement peu élevées [ACI, 1989]. Elle correspond à la méthode (3) qui est décrite dans le rapport 207.5R de l'ACI. Comme pour la méthode des BCR pauvres en liant on procède à partir d'une courbe granulométrique fixée à l'avance. La quantité d'eau à utiliser est déterminée selon l'essai Proctor modifié. À l'aide de cet essai on détermine le pourcentage d'humidité du mélange qui donnera la densité sèche maximale et conséquemment la résistance à la compression maximale (voir figure 2.1). Par après, il suffit de procéder comme pour la méthode des BCR pauvres en liant.

Selon cette méthode, il est important de garder la teneur en matières cimentaires constante pour tous les spécimens et de choisir une granulométrie centrée par rapport aux limites spécifiées pour obtenir un pic distinct sur la courbe de densité maximale [ACI, 1989]. Par ailleurs, même si l'effort de compaction correspond bien aux mesures en place des mélanges [ACI, 1989], Casias, Goldsmith et Benavidez du US Bureau of Reclamation suggèrent d'employer un effort de compaction plus faible. Ces chercheurs ont constaté que l'effort fourni par l'essai Proctor modifié causait trop d'éclatement des gros granulats [HANSEN et coll., 1991]. Or, pour éviter ce problème, il est aussi possible d'utiliser un disque de 140 mm à l'extrémité du marteau employé pour l'essai Proctor modifié et ainsi redistribuer l'effort sur une plus grande surface.

### 3.1.3 Méthode des BCR riches en liant

Cette première méthode de formulation de l'approche béton a été développée par Dunstan et modifiée par le US Bureau of Reclamation pour la conception du barrage de Upper Stillwater [HANSEN et coll., 1991]. Dans la formulation des BCR selon cette méthode on doit avoir assez de liant pour obtenir une faible perméabilité et assurer un bon contact entre les couches de béton successives. Par contre, on doit simultanément réduire les changements de volume occasionnés par le dégagement de chaleur créé par l'hydratation des matières cimentaires. Ce problème est résolu en utilisant des pouzzolanes en remplacement du ciment.

Puisque selon cette méthode les BCR sont formulés pour obtenir la consistance qui permettra une bonne compaction, la quantité d'eau optimale d'un mélange est celle dont la variabilité aura le moins d'effet sur l'effort de compaction nécessaire pour avoir une consolidation totale. On vise donc à avoir légèrement plus de pâte que de vides intergranulaires car il est alors possible d'atteindre environ 98% de la compaction maximale [ACI, 1989]. Les étapes de formulation sont les suivantes

- 1° Déterminer les densités du ciment (C), des pouzzolanes (P), des granulats et de l'eau (E). On détermine également le volume des vides du mélange granulaire qui répond aux exigences du US Bureau of Reclamation.
- 2° Déterminer le rapport  $E/(C+P)$  qui permettra d'atteindre les résistances voulues à partir de la figure 3.2.
- 3° Choisir un rapport pâte/mortier entre 0,34 et 0,42. Un rapport de 0,39 est un bon choix pour débiter.
- 4° Choisir un pourcentage de mortier en se basant sur le fait que le volume de mortier doit excéder le volume des vides de 5 à 10%.
- 5° Le pourcentage de gros granulat est alors calculé en soustrayant le pourcentage de mortier du nombre 1.
- 6° On peut calculer les proportions de tous les constituants avec les valeurs déjà connues et en supposant de 1,5 à 2% d'air entrappé. On calcule pour un volume total de  $1 \text{ m}^3$ . (voir étapes 4 à 9, 2.5.2.6 ACI).

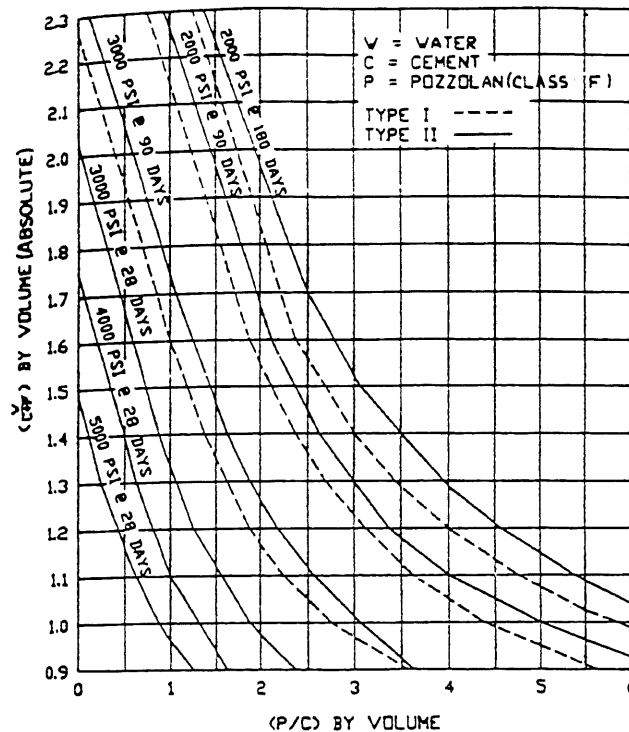


Figure 3.2 Courbes de formulation pour une résistance à la compression voulue

- 7° Un mélange d'essai est donc formulé en laboratoire et le temps Vebe est mesuré. S'il n'est pas satisfaisant, des changements sont faits dans le mélange en commençant par la quantité d'eau. On peut également changer les valeurs des rapports  $E/(C+P)$ ,  $C/P$  ou encore  $(C+P)/\text{sable}$ . Une seule variable est changée à la fois. On ajuste ainsi le mélange jusqu'à ce que tous les critères soient satisfaits, incluant la consistance.

#### 3.1.4 Méthode japonaise (RCD)

Les japonais ont développé leur propre méthode de formulation des BCR. On classe cette méthode dans l'approche béton car en général on obtient de 120 à 130  $\text{kg/m}^3$  de liant dans les mélanges. Deux critères de base servent d'orientation pour la formulation de ces derniers. Tout d'abord, la quantité de ciment doit être aussi faible que possible tout en rencontrant la résistance à la compression. Des cendres volantes sont souvent utilisées afin de réduire la chaleur d'hydratation et la demande en eau. Deuxièmement, le rapport granulat fins/gros granulats est

plus élevé que pour les bétons conventionnels pour prévenir la ségrégation et faciliter la compaction [HANSEN et coll., 1991].

Dans cette méthode de formulation, on procède de la façon suivante; tout d'abord, la quantité de liant est dictée par la résistance requise (voir figure 3.3). Dans les projets de barrages japonais on retrouve entre 20 et 30% de pouzzolanes (cendres volantes surtout) par rapport à la quantité totale de liant. La quantité d'eau est déterminée après avoir fait des essais en laboratoire pour déterminer la masse unitaire du mortier, la résistance à la compression en fonction du pourcentage d'humidité et le temps Vc (équivalent Vebe) en fonction du pourcentage d'humidité.

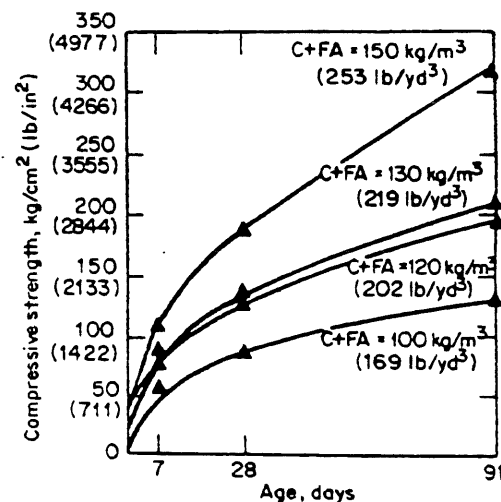


Figure 3.3 Relation entre la teneur en liant et la résistance à la compression pour le barrage Tamagama

À l'aide de ces deux derniers graphiques (figures 3.2 et 3.3), on choisit un pourcentage d'humidité qui donnera un Vc d'environ 20 s. La quantité d'eau à utiliser dans le mélange doit être légèrement supérieure ou équivalente à celle qui donne la résistance maximale. Le pourcentage de gros granulat est choisi de façon à obtenir la masse unitaire maximale. Des essais sur table vibrante servent à déterminer cette valeur. Par la suite, en gardant les quantités de ciment, de cendres volantes et d'eau constantes, on varie le rapport granulat fins/gros granulats et on mesure le Vc correspondant. On sélectionne le rapport qui donne le plus petit Vc. En général, ce rapport

se situe autour de 30 à 32% [HANSEN et coll., 1991]. La quantité finale de liant est déterminée à partir d'une série d'essais donnant la résistance à la compression en fonction de la quantité de ciment. Ensuite le mélange est prêt pour utilisation en chantier.

### 3.1.5 Méthode du US Army Corps of Engineers

Cette méthode de formulation est basée sur les expériences recueillies lors de la construction de barrages en BCR et suit fondamentalement la norme ACI 211.3 *Standard Practice for Selecting Proportions for No-Slump Concrete*. Cette procédure est disponible dans le manuel # 1110-2-2006 du US Corps of Engineers. Ce manuel inclut plusieurs tableaux développés à partir de leurs expériences avec les BCR. C'est une méthode polyvalente qui peut être employée pour une grande variété de projets. Les étapes à suivre, après avoir déterminé les propriétés désirées pour le BCR ainsi que celles des matériaux disponibles, sont:

- 1° Évaluer les granulats. Si on soupçonne la présence de particules plastiques dans les fines, on évalue la limite liquide et l'indice de plasticité et on compare avec les valeurs maximales permises au tableau 3.1. Les granulats doivent être combinés de façon à obtenir une granulométrie à l'intérieur du fuseau de l'ACI. Ce dernier peut être ajusté en fonction du diamètre maximal du gros granulat.

TABLEAU 3.1 TENEURS MAXIMALES EN PARTICULES FINES

	Indice de plasticité				
	0-5	5-10	10-15	15-20	20-25
Limite liquide	% passant le tamis #200				
0-25	10,0	9,0	4,0	3,0	1,5
25-35	9,0	8,0	6,5	5,0	1,5
35-45	8,5	5,5	4,0	2,0	1,5
45-55	5,5	5,0	3,5	3,0	1,5

- 3° Le pourcentage d'air entrappé est supposé représenter 1% du volume total.
- 4° Déterminer le rapport E/C qui convient au projet à partir des spécifications, du manuel du Corps ou des tableaux de l'ACI. Le rapport E/C peut être converti en rapport E/(C+CV) en utilisant le rapport 211.1-89 de l'ACI.
- 5° Calculer la quantité de ciment à partir du rapport E/C et de la quantité d'eau déterminés précédemment.
- 6° Calculer les volumes d'eau, de ciment et de pouzzolanes à partir des masses obtenues.
- 7° Déterminer le volume de granulats en soustrayant les volumes calculés à l'étape précédente de  $1\text{m}^3$ .
- 8° Le pourcentage de gros granulats est déterminé à partir d'un tableau basé sur le  $\phi_{\text{max}}$  et le module de finesse du granulat fin.
- 9° On calcule le pourcentage de granulats fins ( $100\% - \% \text{ gros granulat}$ ) et les volumes respectifs des granulats.
- 10° On compare la quantité de mortier calculée (C+CV+air+sable) avec un tableau.
- 11° On calcule le volume de pâte (mortier - sable) et le rapport pâte/mortier. Dans ce calcul les particules passant le tamis  $80\text{ }\mu\text{m}$  (#200) sont comptées dans la pâte. Le rapport minimum devrait être de 0,42 pour assurer le remplissage des vides des granulats.
- 12° Convertir les volumes en masses et préparer des mélanges d'essai pour avoir le temps Vebe et le pourcentage d'air.
- 13° Ajuster le mélange pour obtenir la consistance désirée.

### 3.1.6 Méthode détaillée de l'approche béton

Cette méthode de formulation a été proposée par TATRO et HINDS [1992]. Voici les étapes de cette méthode:

- 1° Déterminer les exigences liées aux propriétés du mélange de BCR incluant la résistance requise à un certain âge, les conditions et le temps d'exposition,

- 2° Déterminer les principales propriétés des matériaux. Obtenir assez d'échantillons pour faire des mélanges d'essai.
- 3° Si le rapport E/C n'a pas été fixé à l'avance choisir le rapport maximum pour les conditions d'exposition (ACI 211.1-89, tableau A5.8). Comparer ce rapport avec le rapport E/C requis à la figure 3.4, basée sur la résistance moyenne. Prendre le plus petit rapport E/C.

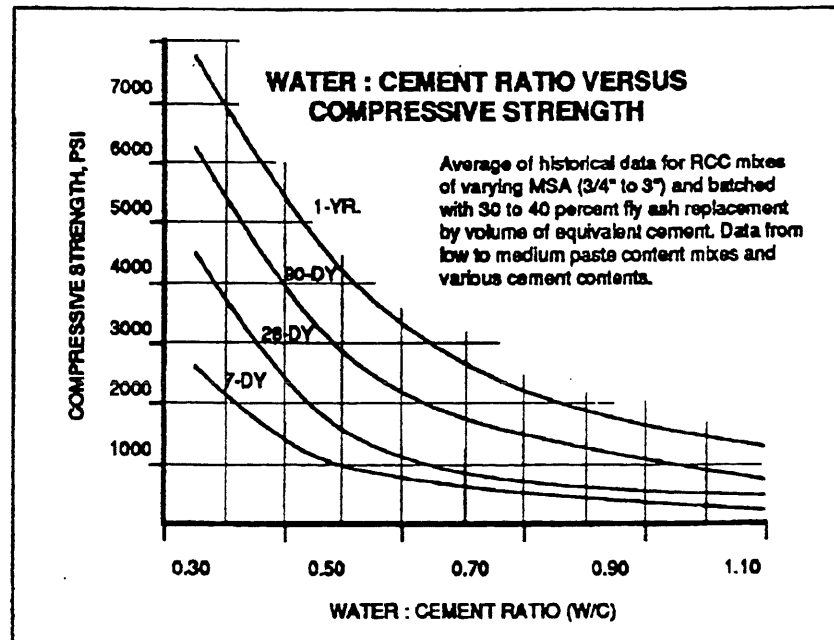


Figure 3.4 Résistance à la compression en fonction du rapport eau/ciment

- 4° Du tableau 3.2 estimer la quantité d'eau et d'air entrappé pour le  $\phi_{\max}$  employé.
- 5° Calculer la quantité de ciment requise à partir des étapes 3 et 4. Si des pouzzolanes sont employées, calculer les quantités en employant le volume équivalent en ciment.
- 6° Calculer la proportion de gros granulats qui correspond le plus à la courbe idéale montrée au tableau 3.3.
- 7° Comparer la courbe granulométrique du granulat fin disponible à celle montrée au tableau 3.3. S'il manque de particules passant le tamis 80  $\mu\text{m}$  on peut ajouter des pouzzolanes ou des matériaux fins naturels comme compléments. À partir du tableau 3.4, choisir la proportion en granulat fin pour le  $\phi_{\max}$  utilisé.



TABLEAU 3.2 QUANTITÉ D'EAU ET D'AIR POUR DES BCR DE DIFFÉRENTS  $\phi_{\max}$

Nominal Maximum Size of Aggregate*						
For a 10 - 20 Second Vebe Range, lbs/cy of Water	3/4-inch		1 1/2-inch		3-inch	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range
	243	228-270	220	171-234	180	144-203
Approximate Air** Content, %	1.9	1.5-2.7	1.2	0.2-2.3	1.2	0.5-3.1
<p>* These quantities are for use in estimating water and air contents for trial batches. Lower range should be used for natural rounded aggregates or mixes with low fine aggregate content; higher range for crushed or higher fine aggregate content.</p> <p>** Air content of minus 1 1/2-inch fraction</p>						

- 8° Calculer les volumes absolus et les masses pour tous les constituants à partir de l'information obtenue aux étapes 2 à 7.
- 9° Calculer la quantité de mortier (granulat fin, ciment, eau et air entrappé) et comparer aux valeurs du tableau 3.4. Ajuster la quantité de granulat fin si nécessaire.
- 10° Calculer la quantité de pâte (fines passant le tamis 80  $\mu\text{m}$ , ciment, pouzzolanes, eau et air entrappé) et le rapport pâte/mortier. Le rapport minimal devrait être 0,42. Ajuster la quantité de fines en conséquence.
- 11° Faire des mélanges d'essais pour vérifier la maniabilité et la résistance du mélange choisi.

TABLEAU 3.3 GRANULOMÉTRIE DES GRANULATS POUR BCR

Sieve Size (Inch)	Cumulative Percent Passing		
	Coarse Aggregate*		
	3-Inch	1 1/2-Inch	3/4-Inch
3	100	—	—
2 1/2	88	—	—
2	78	—	—
1 1/2	61	100	—
1	44	72	—
3/4	33	55	100
1/2	21	35	63
3/8	14	23	41
No. 4	—	—	—
No. 8	—	—	—
No. 16	—	—	—
No. 30	—	—	—
No. 50	—	—	—
No. 100	—	—	—
No. 200	—	—	—
F.M.	—	—	—

* (From CRD-C3-58) Derived from the following formula:		$P = \frac{\sqrt{d - 0.1875}}{\sqrt{D - 0.1875}} \times 100$	d = sieve opening, ins. D = max. size of aggregate, ins. P = cum. % passing
---	--	--	---

TABLEAU 3.4 QUANTITÉS DE SABLE ET DE MORTIER POUR DES BCR DE DIFFÉRENTS  $\phi_{\max}$

Nominal Maximum Size and Type of Coarse Aggregate	Sand Content,* % of Total Aggregate Volume		Mortar Content, cf/cy	
	Average	Range	Average	Range
3-Inch, crushed	34	29-36	12.1	10.3-15.3
3-Inch, rounded	31	27-34	11.7	10.1-14.9
1 1/2-Inch, crushed	42	39-47	15.0	11-7-18.2
1 1/2-Inch, rounded	41	35-45	13.9	12.1-18.2
3/4-Inch, crushed	53	48-59	18.6	17.3-21.3
3/4-Inch, rounded	44	41-45	15.4	—

\* Applies to non-air entrained RCC. Higher range for more coarsely graded fine aggregate with higher fineness modulus.

### 3.2 Fabrication des éprouvettes

Les essais effectués sur le BCR pour en vérifier les différentes propriétés sont les mêmes que ceux qui sont utilisés pour le béton conventionnel ou encore les sols. Par contre, il existe deux procédures qui sont particulières aux BCR: la mesure de la consistance et la préparation des éprouvettes. Il n'y a pas de procédures normalisées pour la fabrication des éprouvettes. ARNOLD et coll. [1992] suggèrent cinq éléments clés pour le développement d'une technique normalisée de fabrication des éprouvettes:

- 1° La méthode devrait être reproductible; elle devrait suivre des étapes fixées et ne pas dépendre des opérateurs.
- 2° Il devrait y avoir peu de variations entre des spécimens préparés par un laboratoire et entre ceux faits par divers laboratoires qui utilisent le même équipement et les mêmes proportions pour les mélanges.
- 3° La méthode devrait utiliser des équipements disponibles dans les laboratoires et qui peuvent être facilement transportables et utilisés en chantier.
- 4° Si possible, la méthode devrait être applicable aux BCR de l'approche sols et de l'approche béton. Si ce n'est pas le cas, les limites de la méthode devraient être spécifiées.
- 5° Les cylindres préparés selon la méthode proposée devraient avoir une densité et des propriétés comparables à celles des échantillons retirés de l'ouvrage qui a été construit avec le même mélange.

Il existe cependant trois méthodes de base pour fabriquer des échantillons représentatifs du travail qui sera fait avec les équipements en chantier. En général, on emploie des cylindres de 6" x 12" (152 mm x 304 mm) pour fabriquer des éprouvettes de BCR. Les cylindres, qui sont typiquement en plastique, sont insérés dans un moule d'acier fendu pour l'étape de la compaction [ARNOLD et coll., 1992]. Ce principe permet d'effectuer une bonne compaction sans déformer les cylindres.

### 3.2.1 Spécimens compactés par impact

Cette façon de fabriquer les éprouvettes s'applique aux BCR de consistance plus sèche qui sont formulés selon l'approche sols. Les cylindres sont fabriqués en incorporant le BCR en plusieurs couches et en appliquant un effort de compaction à chaque couche. Le nombre de couches varie de 3 à 6. Ce n'est vraiment pas le nombre de couches qui est critique mais plutôt le type de pilon ou de marteau qui est utilisé ainsi que la quantité d'énergie qui est appliquée à l'échantillon. La majorité du temps, pour la fabrication de ce genre d'éprouvette, on emploie le même équipement que pour l'essai Proctor modifié. On laisse donc tomber de 450 mm un pilon de 4,5 kg pour produire un effort de compaction d'environ  $2700 \text{ kJ/m}^3$  [HANSEN et coll., 1991; ARNOLD et coll., 1992].

Cependant, des recherches menées au US Bureau of Reclamation ont démontré qu'un effort de compaction plus faible, de l'ordre de  $1100 \text{ kJ/m}^3$ , donnait des spécimens plus représentatifs [HANSEN et coll., 1991]. Ce niveau d'énergie est obtenu en plaçant le BCR en 6 couches de 50 mm et en donnant 50 coups de pilon à chaque couche. De plus, afin de diminuer la fracturation des granulats lors de l'étape de compaction, Wong et coll. [HANSEN et coll., 1991] ont développé un pilon avec un disque de 140 mm de diamètre à son bout. Le pilon employé a été modifié afin de garder la masse de 4,5 kg même avec le disque. L'éprouvette est fabriquée en 3 couches, chacune recevant 93 coups pour un effort de compaction totalisant  $1000 \text{ kJ/m}^3$ . Une plus grande densité est obtenue avec cet outil qu'avec le pilon non modifié. Par contre, cette technique a comme désavantage de nécessiter beaucoup de préparation, particulièrement au chantier où un grand nombre de pilons sont requis et souvent ne sont pas disponibles en nombre suffisant [ARNOLD et coll., 1992].

### 3.2.2 Spécimens vibrés

Cette technique de fabrication en laboratoire est appliquée aux BCR de l'approche béton, c'est-à-dire les BCR dont la quantité de pâte excède le volume des vides intergranulaires. Un cylindre est placé sur une table vibrante (la même que pour l'essai Vebe) et est rempli en 3

couches. Une surcharge de 9,1 kg est placée sur le dessus de chaque couche et le cylindre est vibré jusqu'à ce qu'il y ait remontée de pâte sur les bords de la surcharge. Après la 3<sup>e</sup> couche, on enlève l'excès de béton et on coiffe le cylindre pour pouvoir effectuer différents essais. Cette façon de préparer les éprouvettes ressemble beaucoup à la technique employée par les japonais qui eux utilisent des cylindres de 240 mm x 200 mm. Cette technique a comme défaut de produire des cylindres qui surestiment les propriétés développées dans les structures [ARNOLD et coll., 1992]. C'est une technique de préparation relativement rapide mais coûteuse dû à l'appareil Vebe.

### 3.2.3 Spécimens damés

Cette technique de fabrication des éprouvettes peut être appliquée à tous les types de BCR. On utilise un des appareils suivants dans cette technique de préparation des éprouvettes: le dameur pneumatique (*pneumatic pole tamper*) ou le dameur électrique (*electric powered vibrating rammer ou kango*). En fait, certains chercheurs considèrent l'utilisation de chaque appareil comme deux techniques différentes. On retrouve à l'extrémité de ces appareils un disque de 127 à 146 mm de diamètre. Les deux appareils sont utilisés de façons différentes et ont des fréquences et amplitudes de fonctionnement également particulières (voir tableau 3.5). Par exemple, le dameur pneumatique ne peut être utilisé efficacement avec les BCR riches en liant car la pâte remonte à la surface et adhère à la face du dameur. De plus, avec cet appareil on compacte jusqu'à ce que le marteau rebondisse sur les granulats, ce phénomène démontre l'atteinte de la densité maximum.

TABLEAU 3.5 CARACTÉRISTIQUES DES APPAREILS DE COMPACTAGE

Appareil	Fréquence (coups/min.)	Amplitude
dameur pneumatique	< 600	150 mm
dameur électrique (Kango)	2000 à 2400	imperceptible

On utilise aussi un collet pour s'assurer de pouvoir bien compacter la dernière couche de béton. Également, on retire par tamisage les granulats de diamètre supérieur à 50 mm contenus dans le BCR avant de préparer les éprouvettes. Pour les deux méthodes il faut en général 20 s ou moins pour atteindre la compaction désirée. Ces techniques dépendent cependant de l'expérience des opérateurs; particulièrement lorsque le dameur pneumatique est utilisé. L'effort de compaction appliqué aux éprouvettes n'est donc pas constant. Or, pour éliminer ce problème, il est possible de fixer l'appareil Kango sur un pied. Les résultats obtenus sont alors moins variables. Si on est capable d'obtenir des densités égales à celles produites dans une section d'essai, les résultats sont représentatifs.

Pour la technique du dameur pneumatique, les équipements sont facilement disponibles et les densités obtenues sont assez uniformes. C'est une technique de préparation des éprouvettes rapide mais dont les résultats dépendent de l'opérateur. Le Kango quant à lui fournit une amplitude et une fréquence de vibration similaires à ceux des compacteurs utilisés en chantier. C'est la technique qui répond le mieux aux critères #1 et #3 mentionnés précédemment [ARNOLD et coll., 1992].

## 4.0 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ET PROGRAMME DES ESSAIS

### 4.1 Objectifs de la recherche

Le projet de recherche a pour objectif d'étudier la possibilité d'utiliser l'OPP en tant que matériau fin pour remplacer les cendres volantes généralement introduites dans les BCR spécifiquement formulés pour construire des barrages. L'objectif principal est de formuler un BCR avec OPP et de vérifier, en laboratoire et en chantier si ses caractéristiques sont au moins égales à celles d'un BCR équivalent contenant des cendres volantes.

Les travaux consistent à optimiser le dosage en OPP et en ciment de manière à satisfaire les exigences d'Hydro-Québec dans les domaines suivants:

- Formuler un BCR suffisamment maniable et compactable pour qu'il puisse être produit et mis en place à l'aide des équipements normalement utilisés pour construire un barrage en BCR.
- Satisfaire les exigences minimales pour la résistance mécanique à court et à long termes.
- Produire un BCR dont le dégagement de chaleur en cours de prise est minimal et conforme aux spécifications d'Hydro-Québec.
- Produire un BCR dont la perméabilité respecte les exigences d'Hydro-Québec.

Un autre objectif est de vérifier la validité d'une nouvelle approche de formulation des BCR. Cette approche, plus rigoureuse et plus systématique, est basée sur la théorie des plans d'expériences. Elle devrait notamment permettre de bâtir un modèle de prédiction de la maniabilité, de la résistance à la compression, de la perméabilité et de la température maximale d'hydratation des BCR avec OPP en fonction de leurs principaux paramètres de formulation (teneur en liant, rapport eau/liant, rapport OPP/liant).

## 4.2 Programme des essais

À partir de la composition du BCR employé par Hydro-Québec lors de la construction du barrage du Lac Robertson, nous avons développé un plan d'expériences qui comprend dix BCR (série 1) dont on a fait varier trois paramètres de formulation. Il s'agit de la teneur en liant ( $170 \text{ kg/m}^3$  à  $200 \text{ kg/m}^3$ ), du rapport eau/liant (0,60 à 0,80) et du rapport OPP/liant (40% à 60%). Les BCR fabriqués en laboratoire sont donc formulés à partir des données du tableau 4.1 et de la figure 4.1

TABLEAU 4.1 PLAN FACTORIEL

Mélanges	C+OPP	OPP/(C+OPP)	E/(C+OPP)
1	-1	-1	-1
2	+1	-1	-1
3	-1	+1	-1
4	+1	+1	-1
5	-1	-1	+1
6	+1	-1	+1
7	-1	+1	+1
8	+1	+1	+1
9	0	0	0
10	0	0	0
niveau -1	$170 \text{ kg/m}^3$	40%	0,6
niveau +1	$200 \text{ kg/m}^3$	60%	0,8
niveau 0	$185 \text{ kg/m}^3$	50%	0,7

Pour les BCR de la série 1 les essais suivants ont été faits: consistance Vebe, résistance à la compression à 28 et 91 jours, résistance à la traction à 91 jours (essai Brésilien), dégagement de chaleur de 0 à 7 jours, perméabilité à 91 jours.



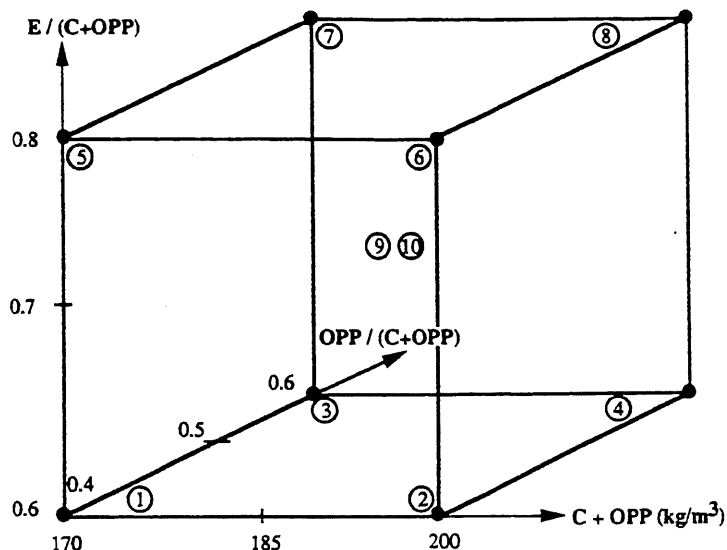


Figure 4.1 Cube représentatif des mélanges du plan factoriel

Un autre groupe de quatre BCR (série 2) sert aux essais d'entraînement d'air. Pour ces BCR, seul le dosage en agent entraîneur d'air a varié. La composition des BCR de la série 2 est donnée au tableau 4.2. Pour ces mélanges les essais suivants sont effectués: consistance Vebe, % air, résistance à la compression à 28 et 91 jours.

TABLEAU 4.2 MÉLANGES SÉRIE 2

Mélange	Propriétés	Dosage en entraîneur d'air (mL/100 kg de liant)
1a	$E/(C+OPP) = 0,6$	200
1b	$C+OPP = 170 \text{ kg/m}^3$	100
1c	$OPP/(C+OPP) = 40\%$	150
2a	$E/(C+OPP) = 0,6$ $C+OPP = 200 \text{ kg/m}^3$ $OPP/(C+OPP) = 40\%$	200

Le programme expérimental inclus des essais en usine dans le but de vérifier s'il est possible de reproduire un BCR en chantier possédant les mêmes caractéristiques que le mélange

formulé en laboratoire. Nous avons choisi d'utiliser la formulation du mélange 2 du plan factoriel pour cet essai car il répond aux exigences d'Hydro-Québec pour ce qui est des résistances, du dégagement de chaleur et de la perméabilité. Sa consistance est également dans les valeurs désirées (temps Vebe entre 10 et 25 s) pour une bonne mise en place à l'aide des équipements de terrassement. Le mélange produit à l'usine a servi à la construction d'une planche d'essai instrumentée pour l'étude du dégagement de chaleur (figure 4.2).

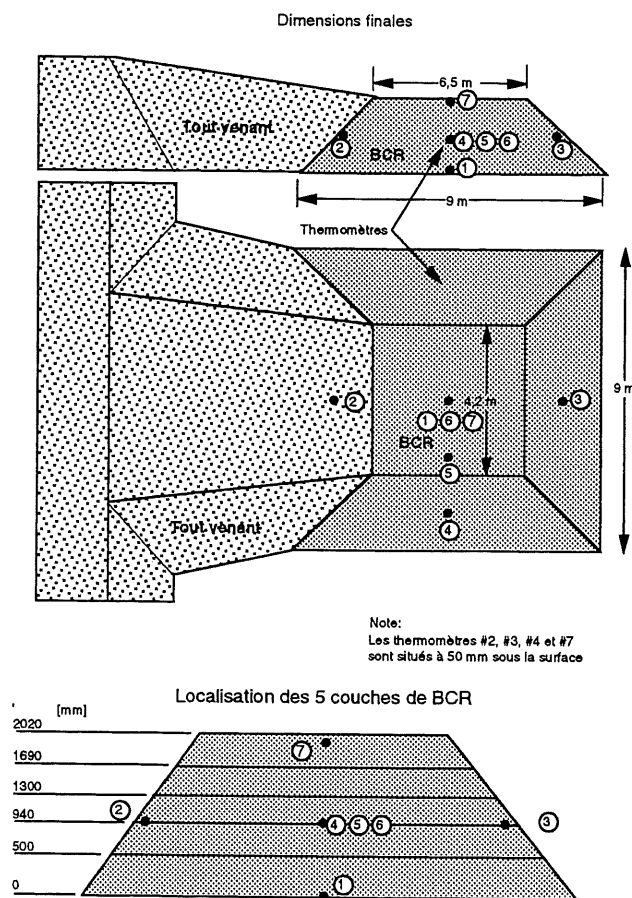


Figure 4.2 Schéma de la planche d'essai

## 5.0 MATÉRIAUX ET OPÉRATIONS

### 5.1 Matériaux

#### 5.1.1 Ciment

Tous les BCR ont été fabriqués avec un ciment Type 20M provenant de l'usine de Lafarge à St-Constant. Ce ciment a une densité de 3,2 et sa courbe granulométrique est montrée à la figure 5.1. La composition de Bogue et l'analyse chimique du ciment utilisé sont présentées dans les tableaux 5.1 et 5.2. On peut constater qu'il s'agit d'un ciment à faible chaleur d'hydratation à cause de sa faible teneur en  $C_3S$  et  $C_3A$  et sa forte teneur en  $C_2S$  et  $C_4AF$ .

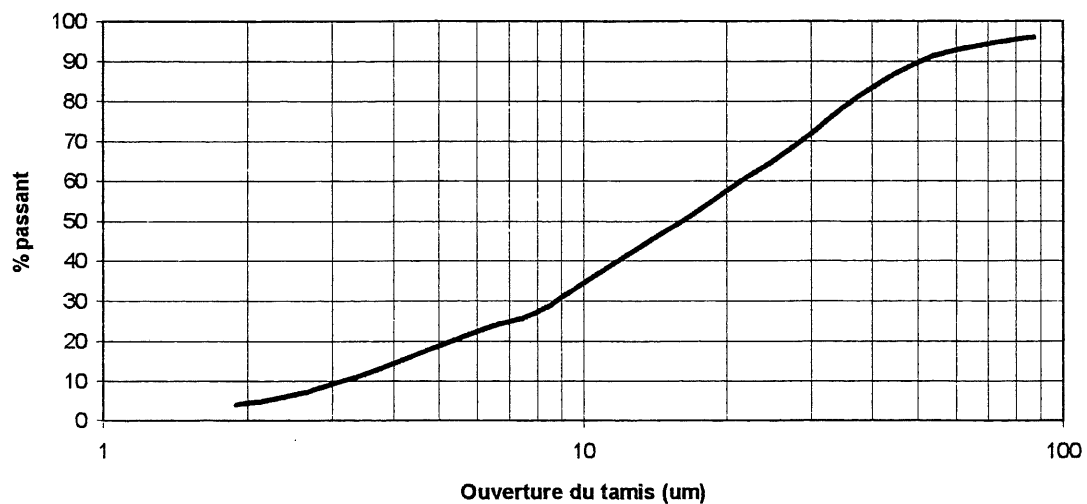


Figure 5.1 Courbe granulométrique du ciment

TABLEAU 5.1 COMPOSITION DE BOGUE DU CIMENT

Composé chimique	Proportions (%)
C <sub>3</sub> A	1
C <sub>3</sub> S	32
C <sub>2</sub> S	44
C <sub>4</sub> AF	15

TABLEAU 5.2 CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DU CIMENT

Élément	Proportion (%)
SiO <sub>2</sub>	23,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,9
CaO	61,5
MgO	2,5
SO <sub>3</sub>	2,3
Na <sub>2</sub> O équivalent	0,5
Perte au feu	0,5

### 5.1.2 Granulats

Des granulats de dimensions variées ont été combinés afin d'obtenir une courbe granulométrique satisfaisante pour un BCR [ACI, 1989]. Le granulat fin est composé d'un mélange de criblure de pierre et d'un sable naturel siliceux. Le sable provient de la carrière Aimé Côté de Lennoxville. Sa densité est de 2,66 et son absorption de 1,2%. La criblure quant à elle provient de la carrière LG de la région de Montréal et est de type granitique. Sa densité est de 2,74 et son absorption de 1,3%. Le gros granulat que nous avons employé est de même type que la criblure de pierre et provient de la même carrière. Les granulométries des différents granulats sont données aux tableaux 5.3 et 5.4.

Les granulats ont été combinés dans les proportions suivantes: 30% de sable; 20% de criblure; 10% de granulat 10 mm; 20% de granulat 14 mm et 20% de granulat 20 mm. La courbe des granulats combinés est donnée à la figure 5.2. Le volume des vides de compactage ( $V_{ve}$ ) du mélange granulaire a été calculé à partir des données recueillies lors de l'essai NQ 2501. Cet essai consiste à remplir, avec notre mélange granulaire, un moule qui sera fixé sur une table vibrante. On pèse ensuite le tout que l'on fixe alors sur la table vibrante. Une plaque d'acier est placée sur le mélange granulaire et on vibre durant 8 minutes. À l'aide d'une jauge, on mesure la différence de hauteur du mélange avant et après vibration. Connaissant la masse, la densité et le volume du mélange granulaire avant et après vibration on peut calculer le volume des vides de compactage. Le volume des vides des granulats utilisés pour ce projet est de  $183 \text{ L/m}^3$  ou 18,3%.

TABLEAU 5.3 GRANULOMÉTRIE DU SABLE ET DE LA CRIBLURE

tamis (mm)	% passant	
	criblure	sable
10	100	100
5	97	98
2,5	65	90
1,25	45	75
0,63	33	53
0,315	24	28
0,16	13	7
0,08	5	2

TABLEAU 5.4 GRANULOMÉTRIE DU GROS GRANULAT

tamis (mm)	% passant		
	20 mm	14 mm	10 mm
28	100	100	100
20	89	100	100
14	23	72	100
10	6	23	100
5	3	1	10
2,5	3	1	3

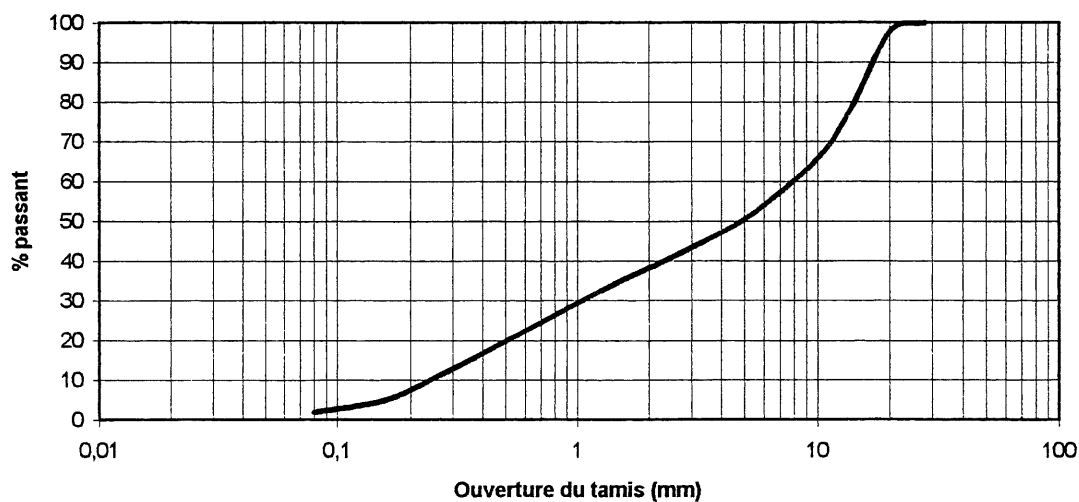


Figure 5.2 Courbe granulométrique combinée

### 5.1.3 Adjuvants

Afin d'améliorer la fluidité et d'allonger le temps de prise des mélanges de BCR, un réducteur d'eau a été employé. Le réducteur est de type WRDA-82 et est fabriqué par la compagnie WR Grace. Pour les essais d'entraînement d'air, un agent entraîneur d'air à base de résine de vinsol a été utilisé: le MB-VR de Master Builders.

#### 5.1.4 OPP

L'OPP a été fourni par l'usine de QIT Fer et Titane de Sorel. Sa composition chimique est montrée au tableau 5.5. Sa densité est 3,3. En vue de pouvoir mieux évaluer le comportement de l'OPP lorsqu'il est introduit dans un mélange à base de ciment portland, divers essais ont été préalablement effectués sur celui-ci. Pour connaître la composition minéralogique de l'OPP, une analyse par diffraction aux rayons X a été effectuée [LAMOTHE, 1995]. Des observations aux rayons X et une analyse granulométrique ont également eu lieu pour étudier la forme et la dimension des particules. L'analyse granulométrique est montrée à la figure 5.3.

TABLEAU 5.5 COMPOSITION CHIMIQUE DE L'OPP

composé	% massique
TiO <sub>2</sub>	23,75
FeO	20,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20,00
SiO <sub>2</sub>	15,65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,46
CaO	2,86
MgO	4,60
MnO	0,14
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,16
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,09
Na <sub>2</sub> O	1,00
K <sub>2</sub> O	0,30
soufre	0,60
carbone	0,51
ZnO	0,06
total	98,18

L'analyse du spectre de DRX indique que l'OPP ne semble pas avoir de phase amorphe (particules vitreuses) puisqu'il n'y a aucune présence de bosse sur le diagramme de la figure 5.4. Par contre, plusieurs composés cristallisés ont été observés. Des pics de diffraction indiquent la

présence d'ilménite ( $\text{FeTiO}_3$ ), d'hématite ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), de magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), de quartz ( $\text{SiO}_2$ ), de feldspaths, de mica et de chlorite. Pour ce qui est des observations au microscope électronique à balayage (MEB), elles ont permis de déterminer que l'OPP se présente généralement sous une forme anguleuse (figure 5.5). Il semblerait également que de très petites particules ( $5\text{ }\mu\text{m}$  et moins) s'agglomèrent pour former de plus gros amas (figure 5.6). Ceci explique pourquoi cette poussière a parfois une apparence grossière.

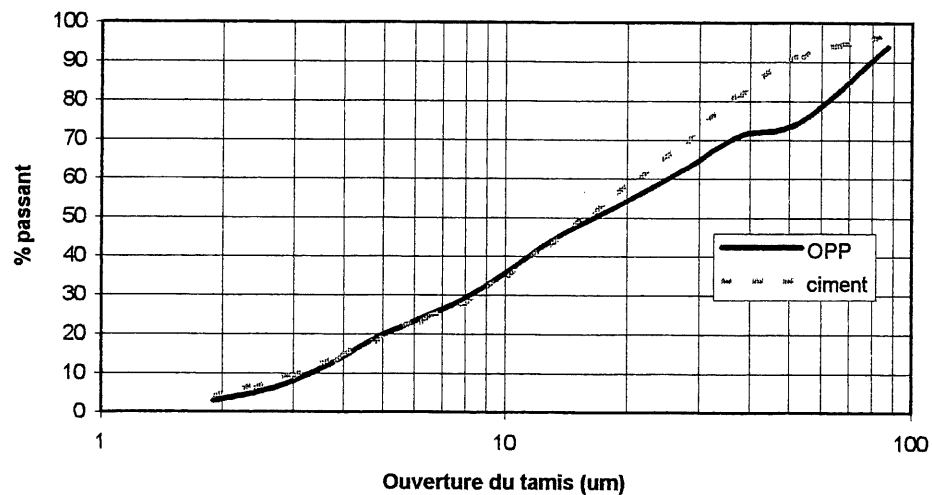


Figure 5.3 Courbe granulométrique de l'OPP



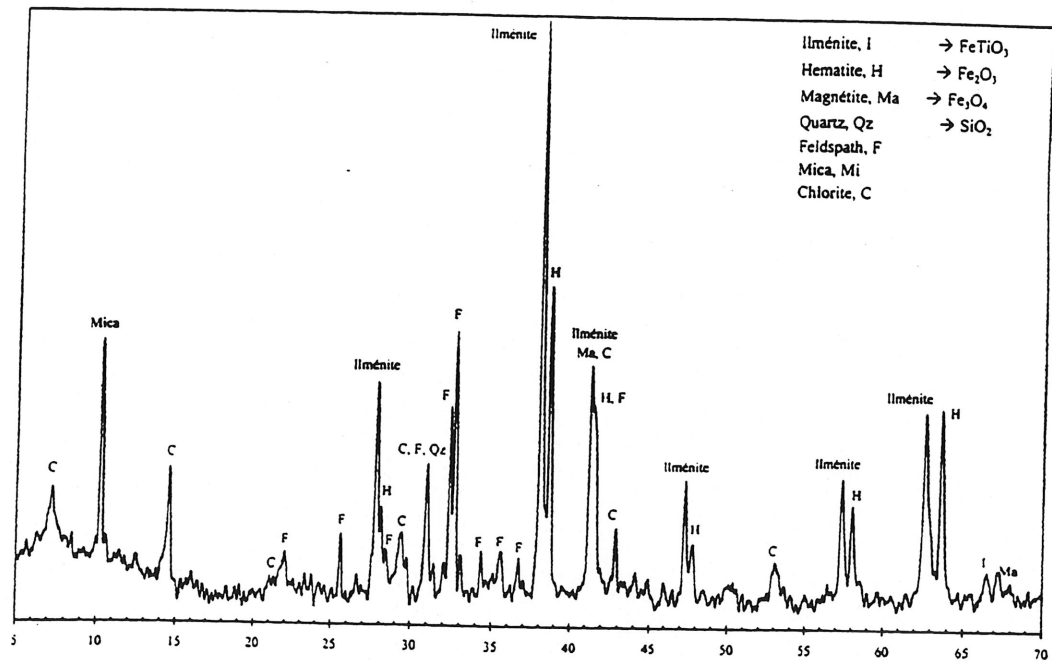


Figure 5.4 Diffractogramme (DRX) des fines de l'OPP

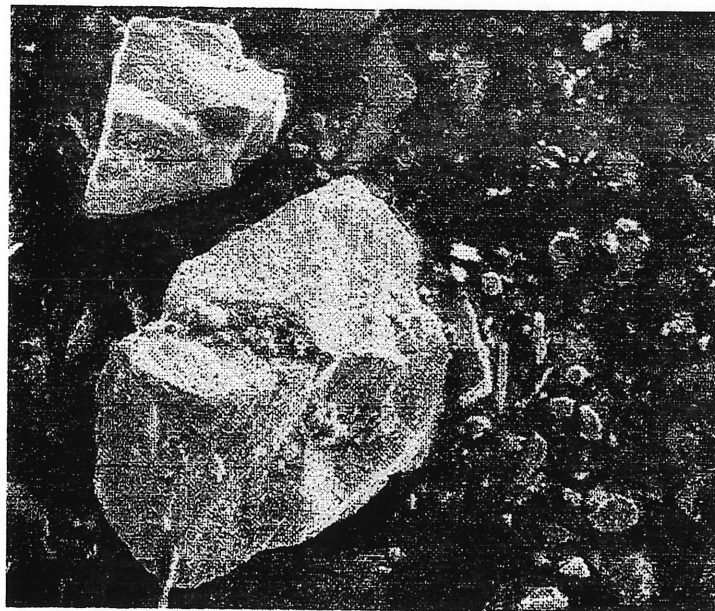


Figure 5.5 Particule anguleuse de 100  $\mu\text{m}$

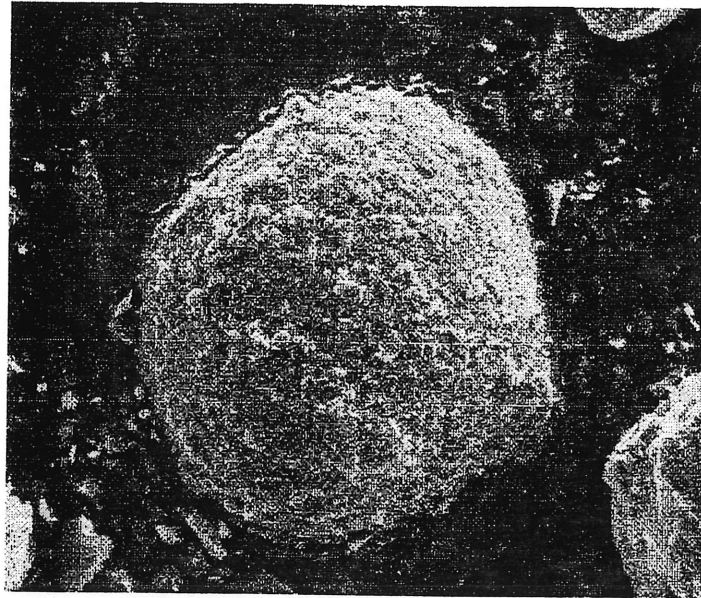


Figure 5.6 Agglomération de particules de 5  $\mu\text{m}$  et moins

#### 5.1.5 Eau de gâchage

Pour le gâchage nous avons utilisé l'eau du robinet provenant du système d'aqueduc de la ville de Sherbrooke.

## 5.2 Mélanges et procédures de gâchage

### 5.2.1 Mélanges de BCR

Comme nous l'avons mentionné au chapitre 4, deux séries de BCR ont été fabriquées. Dans la première série il y a 10 BCR (les mélanges du plan factoriel). Ces BCR ont des teneurs en liant variant de  $170 \text{ kg/m}^3$  à  $200 \text{ kg/m}^3$ , des rapports  $E/L = 0,60$  à  $0,80$  et de 40% à 60% de remplacement du ciment par de l'OPP. La deuxième série de BCR est composée des mélanges 1 et 2 du plan factoriel auxquels on a ajouté diverses doses d'agent entraîneur d'air. Les caractéristiques des mélanges des deux séries sont données aux tableaux 5.6 et 5.7.

TABLEAU 5.6 MÉLANGES SÉRIE 1

Constituants	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Ciment ( $\text{kg/m}^3$ )	105	120	70	81	102	116	68	79	92	93
OPP ( $\text{kg/m}^3$ )	70	80	104	122	68	78	102	117	92	93
Eau ( $\text{kg/m}^3$ )	105	120	104	122	136	155	136	156	129	130
Sable ( $\text{kg/m}^3$ )	657	623	654	635	629	594	628	596	620	624
Criblure ( $\text{kg/m}^3$ )	437	415	435	423	419	396	419	397	414	417
Pierre 10 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	219	208	218	211	209	198	209	199	207	208
Pierre 14 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	437	415	435	423	419	396	419	397	414	417
Pierre 20 mm ( $\text{kg/m}^3$ )	437	415	435	423	419	396	419	397	414	417
Réd. d'eau ( $\text{mL/m}^3$ )	490	560	487	568	476	543	476	549	515	521
Masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ )	2470	2395	2455	2440	2400	2330	2400	2335	2380	2400

TABLEAU 5.7 MÉLANGES SÉRIE 2

Constituants	1a	2a	1b	1c
Ciment (kg/m <sup>3</sup> )	98	108	103	100
OPP (kg/m <sup>3</sup> )	65	72	68	66
Eau (kg/m <sup>3</sup> )	98	108	103	100
Sable (kg/m <sup>3</sup> )	611	561	645	629
Criblure (kg/m <sup>3</sup> )	408	374	431	421
Pierre 10 mm (kg/m <sup>3</sup> )	205	187	216	210
Pierre 14 mm (kg/m <sup>3</sup> )	408	374	431	421
Pierre 20 mm (kg/m <sup>3</sup> )	408	374	431	421
Réd. d'eau (mL/m <sup>3</sup> )	456	504	479	465
AEA (mL/m <sup>3</sup> )	326	360	171	249
Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	2300	2160	2425	2370
Teneur en air (%)	7,0	10,5	6,0	6,6

La composition du BCR produit à l'usine est présentée au tableau 5.8. Ce BCR a été fabriqué avec les granulats locaux (sable naturel siliceux et gros granulat calcaire). La dimension maximale du gros granulat était de 20 mm.

TABLEAU 5.8 CARACTÉRISTIQUES DU BCR PRODUIT EN USINE

Eau	120 kg/m <sup>3</sup>
Ciment	120 kg/m <sup>3</sup>
OPP	80 kg/m <sup>3</sup>
Sable	1140 kg/m <sup>3</sup>
Pierre	1075 kg/m <sup>3</sup>
Réducteur d'eau	200 mL/m <sup>3</sup>
Vebe moyen	15 s
Masse volumique	2535 kg/m <sup>3</sup>

### 5.2.2 Procédures de gâchage

Nous avons effectué des gâchées de 180 kg pour les mélanges de la série 1 alors que pour la série 2 les gâchées étaient de 120 kg et 125 kg. Le malaxage a été fait dans un malaxeur qui fait culbuter les matériaux sur eux-mêmes. La séquence de malaxage utilisée est la suivante:

- 1- homogénéisation du sable pendant 30s
- 2- détermination de la teneur en eau du sable et de la criblure si nécessaire
- 3- ajout de la moitié des granulats, malaxage pendant 60s
- 4- ajout du ciment, de l'OPP et de l'autre moitié des granulats, malaxage pendant 60s
- 5- ajout de l'eau et du réducteur d'eau, malaxage pendant 3 minutes
- 6- mesure du temps Vebe et de la teneur en air (essais avec air entraîné)
- 7- ajout de l'agent entraîneur d'air (essais avec air entraîné)
- 8- malaxage 2 à 3 minutes (essai avec air entraîné)
- 9- mesure de la teneur en air (essai avec air entraîné)

Quant à la construction de la planche d'essai, elle a nécessité la fabrication d'environ 135 m<sup>3</sup> de BCR avec OPP. Tout le BCR a été produit à l'usine de *Béton de l'Estrie* à Rock-Forest. Il s'agit d'une usine de béton prêt à l'emploi équipée d'un malaxeur à arbre horizontal de type *BESNER*. Les 135 m<sup>3</sup> de BCR ont été produits durant la journée du 31 mai 1995.

Étant donné le faible volume de BCR à produire, l'OPP en poudre sèche n'a pas pu être entreposé dans un des silos à ciment de l'usine. Les dix tonnes d'OPP ont donc été entreposées dans une des bennes à sable de l'usine. Cette procédure avait l'avantage de ne pas trop perturber les opérations normales de production de l'usine. Cependant, l'entreposage de l'OPP dans la benne à sable a provoqué des retards de production en raison de l'adhérence de la poudre aux parois de la benne et de la balance. Lors de la séquence de pesage des matériaux, il fallait donc manuellement, à l'aide d'une longue tige, décoller l'OPP qui avait tendance à rester collé sur les parois de la balance. À notre avis, l'utilisation de l'OPP en poudre sèche dans un silo à ciment conventionnel ne devrait pas entraîner de problème de ce genre au niveau du rythme et de la méthode de production du BCR.

Nous n'avons pas constaté de problème de malaxage ni de dispersion de l'OPP dans le malaxeur. Le malaxeur de type *BESNER* s'est révélé particulièrement efficace pour la production

du BCR. Le BCR avec OPP a été produit en gâchées de 3 m<sup>3</sup> dans un malaxeur d'une capacité de 6 m<sup>3</sup>. Le temps requis pour la production d'une gâchée était d'environ 3 minutes. Le BCR a été transporté dans des camions à benne basculante (10 roues) chargés avec 6 m<sup>3</sup> de BCR. Le temps de compaction Vebe a été mesuré à chaque livraison, avant le départ du camion vers le site de construction. Nous n'avons constaté aucun problème de ségrégation lors du transport et de la manutention du BCR.

### 5.2.3 Fabrication, démoulage et technique de cure des éprouvettes

Pour les mélanges de la première série, 11 cylindres de 150 mm x 300 mm étaient fabriqués à chaque gâchée. La répartition des cylindres selon l'utilisation est la suivante: 6 cylindres pour la résistance à la compression dont 3 à 28 jours et 3 à 91 jours, 2 cylindres pour la résistance à la traction par écrasement latéral (essai Brésilien) à 91 jours, 2 cylindres pour la perméabilité à l'eau à 91 jours et 1 cylindre pour le dégagement de chaleur en condition semi-adiabatique. Quant à la série 2, 7 cylindres étaient fabriqués dont 6 pour les essais de résistance à la compression à 28 jours et 91 jours. Le dernier cylindre était de surplus. Le BCR était introduit dans un cylindre en plastique entouré d'une gaine en acier (pour le compactage seulement) puis compacté à l'aide de l'appareil Kango. Le remplissage des cylindres était fait en trois couches.

Les cylindres, qui étaient recouverts avec un couvercle de plastique, étaient ensuite laissés sur une table du laboratoire pour trois jours puis démoulés à l'aide d'un jet d'air sous pression. Suite à des difficultés rencontrées lors du démoulage des cylindres des premiers mélanges, on a par la suite fait tremper les cylindres dans de l'eau chaude quelques secondes avant de démouler. Après le démoulage les cylindres étaient entreposés dans l'eau jusqu'au moment d'être testés.

### **5.3 Essais sur le béton frais**

#### **5.3.1 Temps Vebe et masse volumique**

Immédiatement après la fin du malaxage, on mesure le temps Vebe et la masse volumique en procédant selon la norme ASTM C 1170-91.

#### **5.3.2 Teneur en air**

Pour les mélanges de BCR avec air entraîné, on mesure la teneur en air selon la norme CSA-A23.2-4C modifiée. Puisque le BCR est trop sec pour être pilonné on l'introduit en deux couches dans le moule puis on le vibre sur l'appareil Vebe jusqu'à ce qu'il y ait une remontée de pâte sur les bords du contenant. Après la compaction on ajoute un peu de BCR pour bien remplir le moule, puis, on arase la surface. Lors de la vibration, une surcharge spécialement conçue pour le moule est posée sur le BCR. La pression exercée est donc la même que celle de l'essai Vebe.

## **5.4 Essais sur le béton durci**

### **5.4.1 Dégagement de chaleur**

Un cylindre pour chaque mélange de la série 1 a servi à déterminer le dégagement de chaleur lors des sept premiers jours d'hydratation. Nous avons employé un cylindre qui contenait un thermocouple. Le cylindre était installé dans un calorimètre semi-adiabatique de marque *Technodes*. Le calorimètre a une section carrée de 50 cm et mesure 56 cm de haut. L'intérieur est rempli d'isolant sauf au centre où on retrouve un espace pour insérer le cylindre. L'acquisition de données a été fait par un appareil (*scanning thermocouple thermometer*) de façon automatique.

### **5.4.2 Résistance à la compression**

La résistance à la compression est obtenue en faisant la moyenne de trois essais sur des cylindres d'un même mélange. La résistance à la compression est déterminée après 28 jours et 91 jours de mûrissement. Tous les essais de résistance à la compression ont été effectués selon la norme CSA-A23.2-9C.

### **5.4.3 Résistance à la traction**

Pour les mélanges de la série 1, deux cylindres ont servi à la détermination de la résistance à la traction après 91 jours de mûrissement. La norme CSA-A23.2-13C a servi à la détermination de cette valeur.

### **5.4.4 Perméabilité à l'eau**

Des essais de perméabilité à l'eau ont été faits sur les mélanges de la série 1. Pour cet essai les cylindres ont subi une préparation. Ils ont d'abord été carottés au centre ( $\phi = 27$  mm) de



façon à obtenir un cylindre creux. Par la suite ils ont été surfacés aux extrémités. L'essai de perméabilité utilisé a été développé au département de génie civil et se déroule de la façon suivante. Des membranes de caoutchouc sont collées aux extrémités des cylindres à l'aide d'une colle contact. Les cylindres sont ensuite installés dans des cellules. On remplit d'abord le centre du cylindre avec de l'eau. Par la suite on remplit le reste de la cellule de manière à entourer le cylindre d'eau. On applique alors une pression d'eau de l'extérieur du cylindre vers son centre. L'eau qui passe au travers du cylindre est récupérée dans une burette graduée. Des lectures sont prises à différents niveaux de pression en commençant par 200 psi (1380 MPa) et en augmentant de 200 psi à la fois. L'essai est arrêté lorsque l'écoulement se fait trop rapidement pour pouvoir prendre les lectures. Un logiciel est ensuite employé pour calculer le coefficient de perméabilité à partir des volumes d'eau percolée [PERRATON et al., 1988]. Un schéma d'une cellule est montré à la figure 5.7.

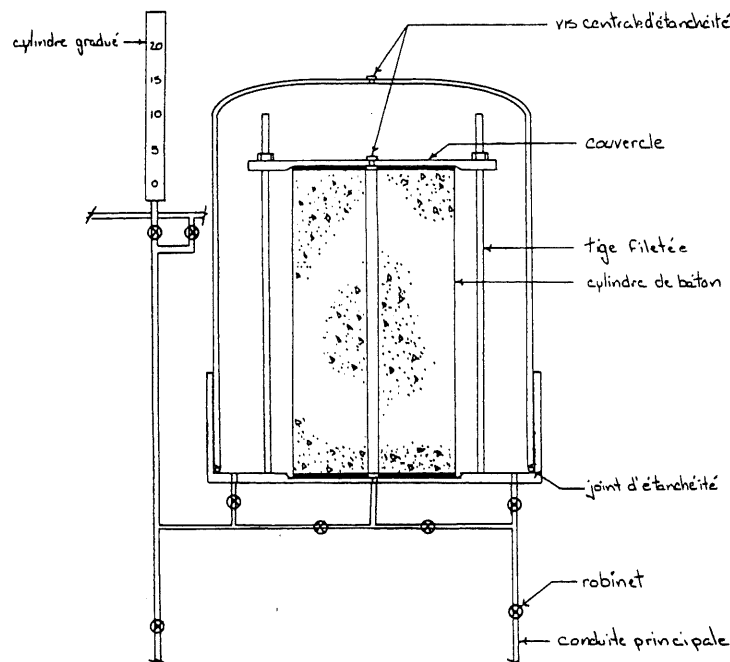


Figure 5.7 Schéma d'une cellule pour l'essai de perméabilité à l'eau

## 6.0 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Ce chapitre décrit les principaux résultats obtenus lors des essais de laboratoire. Ils sont principalement donnés sous la forme de tableaux ou de graphiques. La synthèse de ces résultats fera l'objet du chapitre suivant.

### 6.1 Mélanges du plan factoriel (série 1)

Avant d'analyser les résultats selon la technique des plans factoriels, nous avons choisi de faire une analyse conventionnelle afin de récupérer le plus d'information possible des travaux de recherche. Les sections 6.1.1 à 6.1.5 sont consacrées à l'analyse conventionnelle alors que la section 6.1.6 présente les résultats de l'analyse factorielle.

#### 6.1.1 Temps Vebe

Puisque les BCR n'ont pas d'affaissement, nous utilisons le temps Vebe comme indice de la consistance du béton. Le tableau 6.1 présente les temps Vebe obtenus pour les mélanges de la série 1. Pour chaque mélange on retrouve le volume de pâte ( $V_p$ ). Ce volume correspond à la somme des volumes de ciment, d'OPP et d'eau contenus dans le mélange. On trouve également, dans ce tableau, le rapport entre le volume de pâte et le volume des vides de compactage ( $V_{vc}$ ) du mélange granulaire pour tous les mélanges. Quant à la figure 6.1, elle permet une meilleure vue d'ensemble des résultats. En effet, cette figure montre l'influence du rapport  $V_p/V_{vc}$  sur les temps Vebe obtenus. Ce rapport a été calculé en utilisant une valeur du volume des vides de compactage égale à  $183 \text{ L/m}^3$  (voir section 5.1.2).

TABLEAU 6.1 TEMPS VEBE ( SÉRIE 1)

Mélange	$V_p$ (L/m <sup>3</sup> )	$V_p/V_{vc}$	Temps Vebe (s)
1	159	0,87	57
2	182	0,99	12
3	158	0,86	55
4	184	1,00	15
5	189	1,03	5
6	215	1,17	4
7	188	1,03	6
8	216	1,18	4
9	186	1,02	20
10	187	1,02	11

On peut voir au tableau 6.1 que le mélange 9 a un temps Vebe de 20 s supérieur à celui du mélange 10 qui pourtant possède la même formulation. Cette différence peut être due à deux facteurs soit: la subjectivité de l'essai et les granulats employés. Le mélange 9 a été un des premiers mélanges réalisés, donc le manque d'habitude de l'opérateur peut avoir influencé la détermination du temps Vebe. De plus, des lots de granulats différents ont été utilisés pour ces mélanges. Il se peut que l'indice des vides ait varié légèrement et donc que la valeur du rapport  $V_p/V_{vc}$  ne soit pas exacte pour le mélange 9. On constate aussi dans ce tableau que plus les mélanges ont un volume de pâte important, et donc un rapport  $V_p/V_{vc}$  élevé, plus le temps Vebe est faible. Ce phénomène est d'autant plus évident sur la figure 6.1. On peut voir que, lorsque  $V_p/V_{vc}$  est plus grand que 1, le temps Vebe tend vers une valeur nulle. On remarque également que, pour des valeurs de  $V_p/V_{vc}$  situées entre 0,85 et 1, les temps Vebe varient beaucoup plus rapidement.

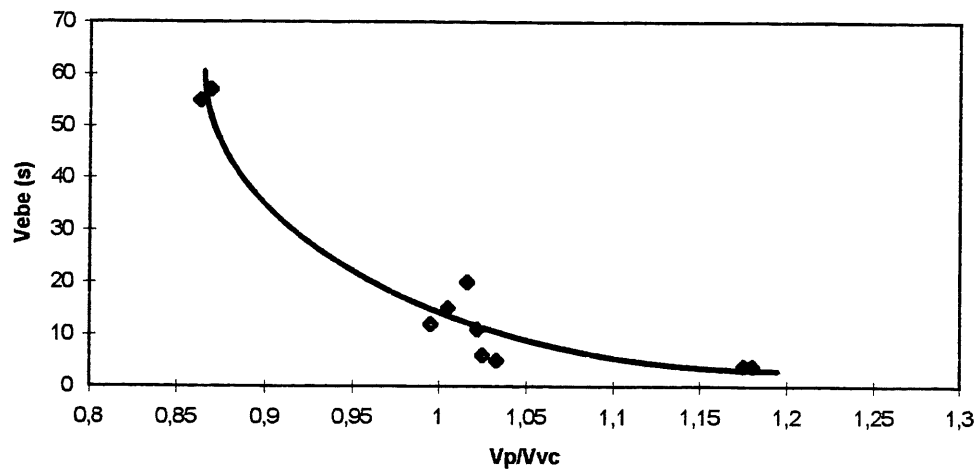


Figure 6.1 Temps Vebe en fonction de  $V_p/V_{vc}$

#### 6.1.2 Dégagement de chaleur

Le dégagement de chaleur a été suivi sur une période de 7 jours à partir du moment de mise en place du BCR dans les cylindres. Les valeurs des dégagements de chaleur obtenus après 7 jours sont montrés au tableau 6.2. Les  $\Delta T$  mesurés représentent la différence entre la température du béton après 7 jours de mûrissement dans un contenant isolé et sa température initiale. L'heure à laquelle le dégagement de chaleur a atteint un maximum est aussi donnée dans le tableau 6.2. Dû à un mauvais fonctionnement du système d'acquisition, les données des mélanges 3 et 4 n'ont pu être récupérées. Les courbes de dégagement de chaleur pour les autres mélanges sont disponibles à l'annexe A. Par ailleurs, la relation entre le dégagement de chaleur et la teneur en ciment est montrée à la figure 6.2.

TABLEAU 6.2 DÉGAGEMENT DE CHALEUR

Mélange	Teneur en ciment (kg/m <sup>3</sup> )	Teneur en liant (kg/m <sup>3</sup> )	T <sub>max</sub> atteinte à	Élévation de température $\Delta T$ (°C)
1	105	175	33h	5,0
2	120	200	38h	6,7
3	70	174	-	-
4	81	203	-	-
5	102	170	25h	3,9
6	116	194	37h	7,5
7	68	170	53h	4,0
8	79	196	29h	4,1
9	92	184	37h	5,9
10	93	186	31h	4,1

On remarque au tableau 6.2 que les élévations de température des différents mélanges de BCR sont assez faibles. En fait, elles sont toutes inférieures à 8°C ce qui est très acceptable. On constate également que la température maximale est atteinte en moyenne après 35 heures. Les mélanges 5 et 7 atteignent leur température maximale à des heures assez éloignées de cette valeur. Ces écarts sont difficilement explicables. Il se pourrait entre autres que ces écarts soient dus à un manque d'homogénéité des BCR ou à une variation des conditions atmosphériques dans la salle où étaient gardés les BCR. Sur la figure 6.2 on voit bien que l'élévation de température est proportionnelle à la quantité de ciment contenue dans le mélange.

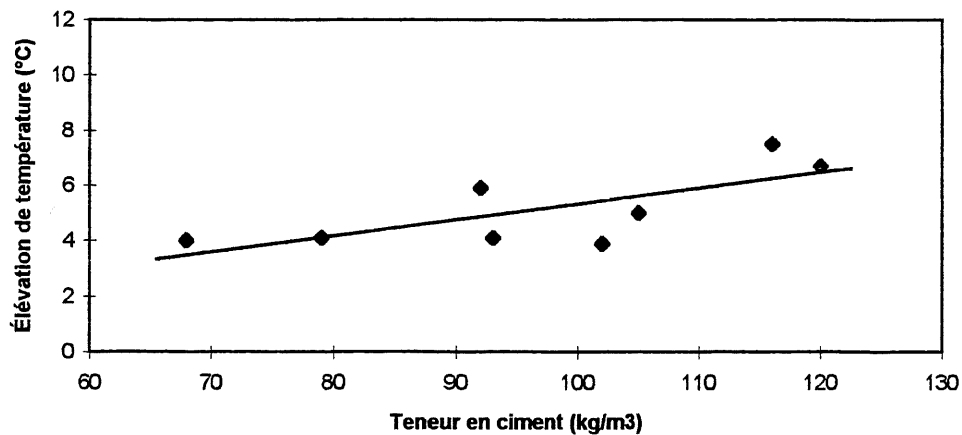


Figure 6.2 Élévation de température en fonction de la teneur en ciment

### 6.1.3 Résistance à la compression

Les valeurs de résistance à la compression pour les mélanges de la série 1 sont données au tableau 6.3. Dû à une erreur de manipulation, les mélanges 1 et 7 ont été testés à des périodes de 21 jours et 35 jours respectivement. Les valeurs de résistances corrigées sont estimées à partir de l'augmentation moyenne des résistances de 28 jours à 91 jours pour les autres mélanges. Les relations entre la résistance à la compression et le rapport E/L ainsi que le rapport E/C à 91 jours sont montrés respectivement à la figure 6.3 et à la figure 6.4. À la figure 6.5 on remarque l'augmentation de la résistance entre 28 et 91 jours en fonction du rapport E/C.

TABLEAU 6.3 RÉSISTANCES À LA COMPRESSION (SÉRIE 1)

Résistance à la compression (MPa)											
Mélange	E/L	E/C	28 jours					91 jours			
			1	2	3	moy	f <sub>c</sub> corr.	1	2	3	moy
1	0,6	1,00	8,9	8,9	8,5	8,8*	10,1	19,4	19,2	20,0	19,5
2	0,6	1,00	10,0	10,6	10,9	10,5	10,5	21,3	21,1	21,1	21,2
3	0,6	1,50	7,1	7,6	7,1	7,3	7,3	13,3	12,8	12,5	12,9
4	0,6	1,50	6,9	6,8	6,7	6,8	6,8	12,8	12,8	11,7	12,4
5	0,8	1,33	5,1	5,4	4,9	5,1	5,1	11,5	11,3	12,0	11,6
6	0,8	1,33	3,4	3,2	6,7	4,5	4,5	7,6	8,7	7,9	8,1
7	0,8	2,00	4,2	4,6	4,5	4,5*	3,6	6,8	7,4	6,6	6,9
8	0,8	2,00	3,0	3,4	3,2	3,2	3,2	5,9	5,8	6,4	6,0
9	0,7	1,40	6,3	5,9	5,7	5,9	5,9	12,7	11,5	11,6	12,0
10	0,7	1,40	6,8	6,6	7,1	6,8	6,8	12,2	12,9	13,3	12,8

\* mélange 1 testé à 21 jours et mélange 7 testé à 35 jours

Comme le montre le tableau 6.3, les résistances à la compression des trois cylindres de chaque mélange varient en général d'une valeur inférieure à 1 MPa. Les cylindres du mélange 6 font exception à cette règle à 28 jours de mûrissement. La différence entre la plus haute et la plus faible valeur est de 3,5 MPa; ce qui est énorme considérant que la moyenne des résistances est de 4,5 MPa. Cet écart s'explique par un problème rencontré lors de la fabrication des cylindres. Le béton étant transvidé dans une brouette après le malaxage, l'excédant d'eau s'est retrouvé au fond et conséquemment, les derniers cylindres fabriqués se sont retrouvés avec un E/L plus grand que prévu. En fait, on aurait dû s'attendre à des valeurs d'environ 5 MPa.

À 91 jours également, les valeurs de résistance obtenues pour ce mélange sont plus faibles qu'attendues. La figure 6.3 démontre bien ce fait. Sur cette figure, le point accompagné d'un astérisque représente la résistance à la compression mesurée pour le mélange 6. On voit qu'il est plus éloigné de la courbe que les autres points. D'ailleurs, les résistances pour des mélanges de même E/C sont assez voisines sauf pour les mélanges 5 et 6. Cette figure montre aussi que la résistance à la compression est inversement proportionnelle au rapport E/C du BCR. Pour ce qui est de la figure 6.4, on perçoit très bien l'influence du pourcentage d'OPP contenu dans les

mélanges sur la résistance obtenue. Ainsi plus il y a d'OPP, plus la résistance est faible pour des rapport E/L constants. On remarque tout de même que l'influence du rapport E/L est plus importante que le pourcentage d'OPP employé.

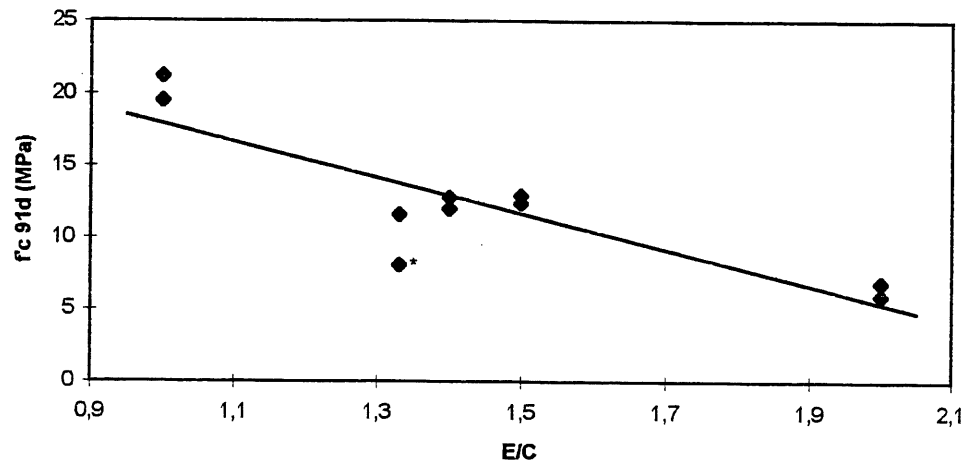


Figure 6.3 Résistance à la compression à 91 jours en fonction du rapport E/C

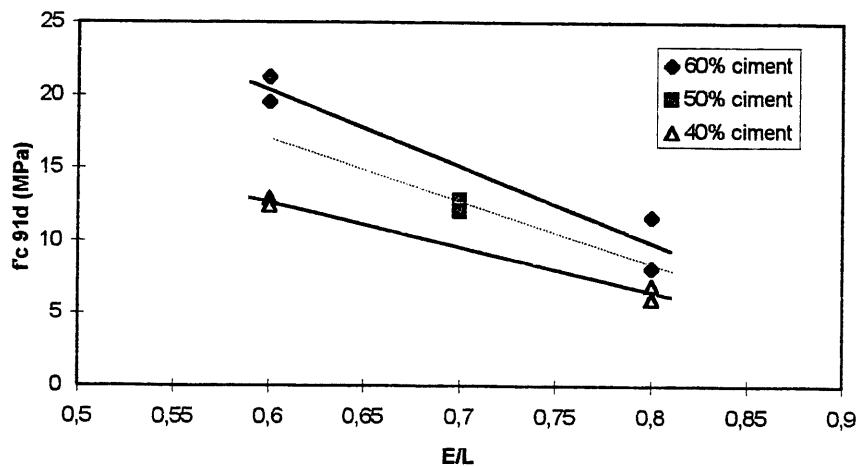


Figure 6.4 Résistance à la compression à 91 jours en fonction du rapport E/L



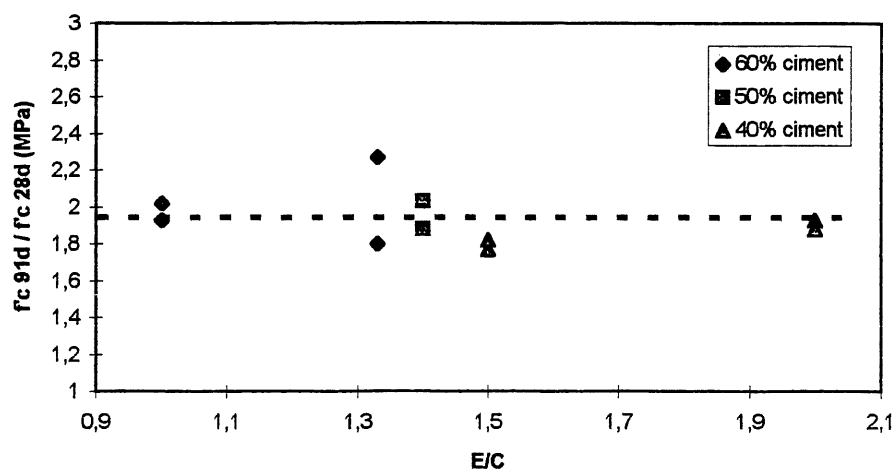


Figure 6.5 Augmentation de la résistance à la compression entre 28 et 91 jours

La figure 6.5 montre l'augmentation de la résistance à la compression entre 28 et 91 jours. Ici on remarque que le pourcentage d'OPP n'a pas d'influence sur l'augmentation de la résistance. Le rapport entre la résistance à 28 jours et la résistance à 91 jours est en moyenne de 1,93.

#### 6.1.4 Résistance à la traction

La résistance à la traction a été mesurée à l'aide de l'essai Brésilien. Les résistances obtenues sont données au tableau 6.4. Ce tableau contient également le rapport entre la résistance à la traction et la résistance à la compression. Il y a moins de variabilité dans les valeurs de résistance à la traction que dans les valeurs de résistance à la compression. Le rapport  $T_r/f_c$  est relativement constant variant de 0,11 à 0,14 avec une majorité de valeurs à 0,12 et 0,13 pour une moyenne de 0,125.

TABLEAU 6.4 RÉSISTANCES À LA TRACTION (SÉRIE 1)

Résistance à la traction 91d (MPa)						
Mélange	E/L	E/C	1	2	moy	Tr/f <sub>c</sub>
1	0,6	1,00	1,7	2,5	2,1	0,11
2	0,6	1,00	2,6	2,7	2,7	0,13
3	0,6	1,50	1,8	1,6	1,7	0,13
4	0,6	1,50	1,6	1,5	1,5	0,12
5	0,8	1,33	1,4	1,5	1,4	0,12
6	0,8	1,33	1,0	0,9	1,0	0,12
7	0,8	2,00	0,8	0,8	0,8	0,12
8	0,8	2,00	0,8	0,7	0,8	0,13
9	0,7	1,40	1,8	1,6	1,7	0,14
10	0,7	1,40	1,6	1,6	1,6	0,13

Les valeurs de résistance à la traction à 91 jours en fonction du rapport eau/liant sont données à la figure 6.6, alors que celles de la résistance en fonction du rapport eau/ciment sont montrées à la figure 6.7. Sur ces figures on remarque les mêmes phénomènes qu'aux figures 6.3 et 6.4. C'est-à-dire que la résistance, pour un rapport E/L constant, est influencée par le pourcentage d'OPP présent dans le mélange. Plus ce pourcentage est élevé, plus la résistance est faible. Le rapport E/L a tout de même un effet plus marqué sur la résistance à la traction que le pourcentage d'OPP contenu dans le mélange. Par ailleurs, la résistance à la traction est inversement proportionnelle au rapport E/C.

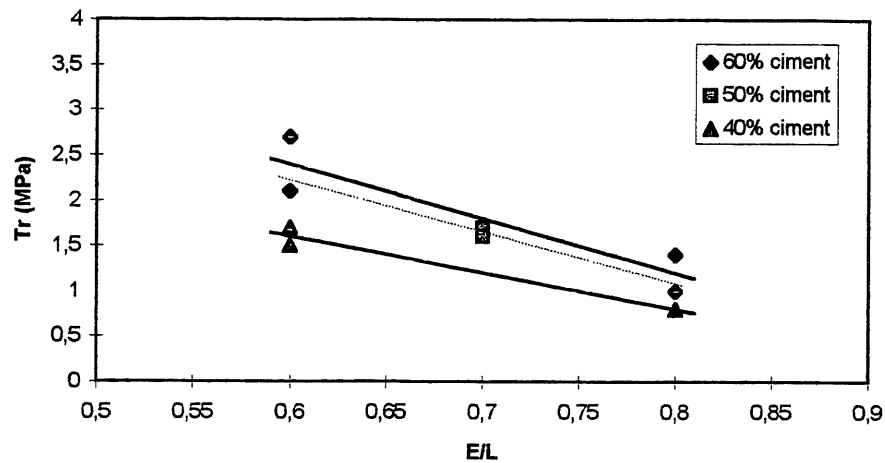


Figure 6.6 Résistance à la traction à 91 jours en fonction du rapport  $E/L$

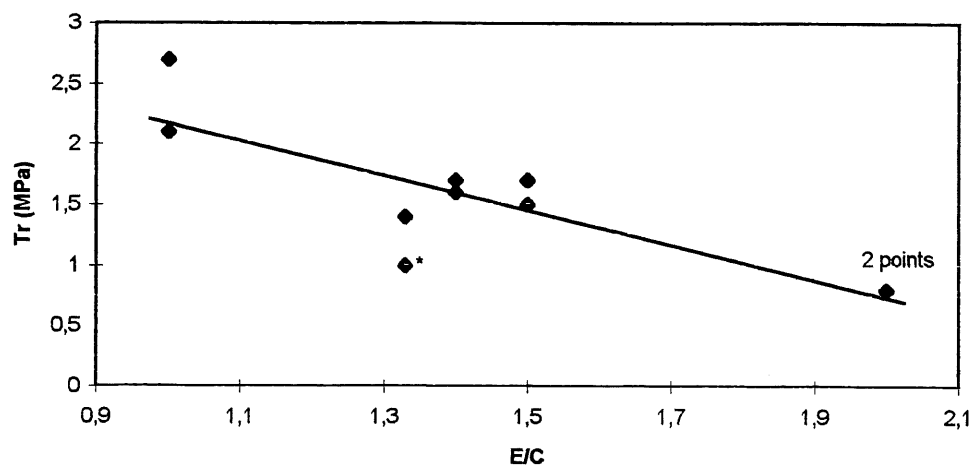


Figure 6.7 Résistance à la traction à 91 jours en fonction du rapport  $E/C$

#### 6.1.5 Perméabilité à l'eau

Les valeurs de perméabilité à l'eau mesurées en fonction du niveau de pression sont données pour chaque mélange au tableau 6.5. La relation existant entre la résistance à la compression et la perméabilité est montrée à la figure 6.8.

mélange 8 n'a entre autres qu'une seule donnée car un des cylindres employés pour l'essai coulait et a dû être éliminé dès le début. La figure 6.8 montre très bien la relation existant entre la résistance à la compression et la perméabilité du BCR. Les mélanges possédant des bonnes résistances sont moins perméables que ceux dont les résistances sont faibles. On peut voir que pour les mélanges dont la résistance est inférieure à 7 MPa le coefficient de perméabilité est nettement plus grand que celui des autres mélanges.

TABLEAU 6.5 PERMÉABILITÉ À L'EAU DES MÉLANGES DE LA SÉRIE 1

K <sub>eau</sub> (x 10 <sup>-12</sup> m/s)											
Niveau de pression (KPa)											
Mélange	1380		2760		4140		5520		6900		moy
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
1	4,6	2,7	5,8	4,5	6,7	5,9	7,4	6,6	7,0	7,8	6
2	3,0	3,6	5,0	4,7	6,4	5,5	5,5	5,1	6,6	5,5	5
3	19	20	38	25	45	28	-	-	-	-	29
4	18	17	27	24	30	26	-	-	-	-	24
5	38	35	46	40	56	49	62	54	60	52	49
6	29	26	43	35	49	41	-	-	-	-	37
7	560	360	-	-	-	-	-	-	-	-	460
8	-	820	-	-	-	-	-	-	-	-	820
9	11	15	20	26	31	31	-	-	-	-	22
10	10	9	20	7	22	11	24	14	13	13	15

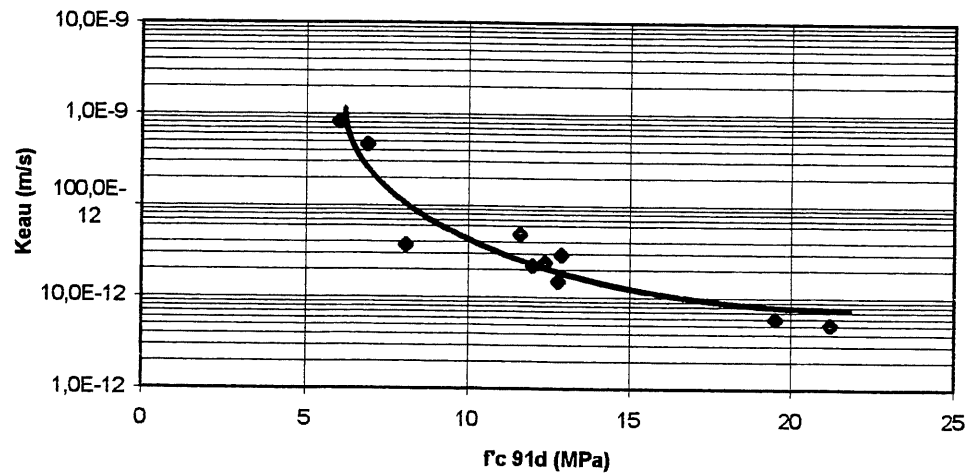


Figure 6.8 Perméabilité à l'eau à 91 jours en fonction de la résistance à la compression

#### 6.1.6 Résultats de l'analyse factorielle

À l'aide des calculs de l'analyse factorielle (voir l'annexe B), il est possible de représenter l'effet des variables (rapport eau/liant, rapport OPP/liant, teneur en liant) sur les différentes propriétés du béton. Puisqu'il manque des valeurs de dégagement de chaleur, l'analyse factorielle n'a pas été faite sur ces données. L'analyse a par contre permis de tirer des équations montrant les relations entre les variables et les propriétés suivantes: le temps Vebe; la perméabilité, la résistance à la compression et la résistance à la traction. L'analyse de variance pour la perméabilité a montré que le pourcentage d'OPP et le rapport eau/liant avaient un effet sur cette dernière. Cependant, il faut faire une transformation sur les valeurs mesurées pour avoir une équation adéquate. Il a donc été décidé de ne pas présenter la relation obtenue car elle n'est pas pratique à utiliser. Les résultats de l'analyse sont tout de même présentés à l'annexe B.

L'analyse factorielle est faite à partir des données du tableau 4.1. Les équations qui vont suivre sont données sous la forme

"mesure = cste + A/2  $x_1$  + B/2  $x_2$  + C/2  $x_3$  + AB/2  $x_1x_2$  + AC/2  $x_1x_3$  + BC/2  $x_2x_3$  + ABC/2  $x_1x_2x_3$ " où:

cste = moyenne des réponses mesurées

A,B,C, etc. = effets des variables (calculés par Statpac)

$x_1$  = niveau associé à la variable C+OPP (-1 à +1)

$x_2$  = niveau associé à la variable OPP/(C+OPP) (-1 à +1)

$x_3$  = niveau associé à la variable E/(C+OPP) (-1 à +1)

#### A) Le temps Vebe

L'analyse de variance montre que seule la teneur en liant et le rapport eau/liant ont un effet sur le temps Vebe. L'équation qui permet d'estimer le temps Vebe d'un mélange est:

$$\text{Vebe} = 19,75 - 11x_1 - 15x_3 + 10,25x_1x_3$$

La figure 6.9 montre les courbes isoréponses obtenues à l'aide de cette équation. Ce graphique se révèle être très pratique pour choisir les proportions des constituants d'un BCR avec OPP en fonction d'un niveau de maniabilité et de résistance désiré. Par exemple, on pourrait faire 2 BCR ayant un Vebe de 15 s qui ont des formulations différentes selon la résistance voulue. Dans un premier cas, si l'on désire une résistance à la compression de 20 MPa il faut choisir un rapport E/L de 0,60 (voir figure 6.10). On devrait alors utiliser 195 kg/m<sup>3</sup> de liant dans le mélange. Pour un deuxième cas où on ne voudrait que 8 MPa de résistance à la compression, un rapport E/L de 0,78 peut être utilisé (voir figure 6.10) et on doit alors utiliser 180 kg/m<sup>3</sup> de liant.

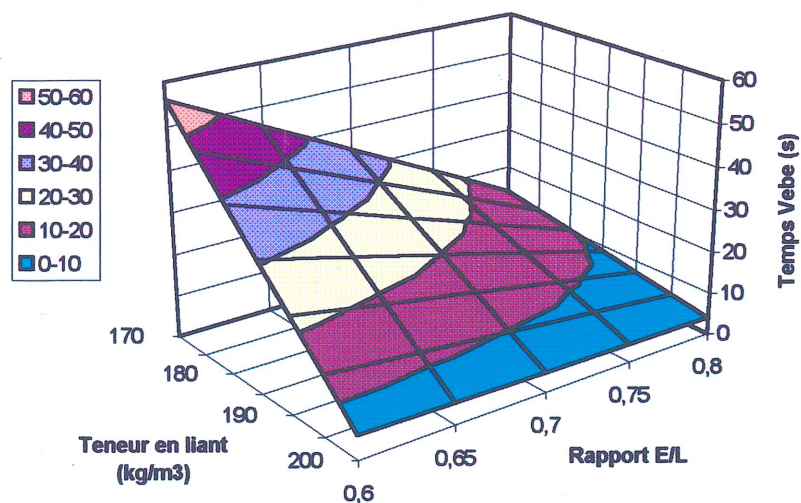


Figure 6.9 Isoréponses - Temps Vebe

Par ailleurs, au tableau 6.6 on donne les valeurs estimées par l'équation et les valeurs mesurées en laboratoire. On voit que les valeurs calculées selon le modèle sont très proches des valeurs mesurées.

TABLEAU 6.6 VALEURS ESTIMÉES ET VALEURS MESURÉES - temps Vebe

Vebe mesuré	Vebe estimé	Écart
(s)	(s)	(s)
57	56	1
12	13,5	1,5
55	56	1
15	13,5	1,5
5	5,5	0,5
4	4	0
6	5,5	0,5
4	4	0

### B) Résistance à la compression

Selon l'analyse factorielle, la teneur en liant et le rapport eau/liant sont les seules variables à avoir un effet sur la résistance à la compression. Puisque ce sont les valeurs à 91 jours qui sont

considérées pour la conception des barrages, ce sont ces dernières qui ont servi à l'analyse factorielle. L'équation obtenue pour la résistance à la compression est:

$$f_c = 12,325 - 2,775 x_2 - 4,175 x_3$$

La figure 6.10 montre les courbes isoréponses obtenues à l'aide de cette équation. Ce graphique permet de déterminer les caractéristiques des BCR avec OPP en fonction des propriétés mécaniques souhaitées à 91 jours. Il est ainsi possible de produire un BCR ayant une résistance à la compression de 15 MPa avec soit un rapport E/L de 0,75 et un rapport OPP/L de 0,4 ou bien un rapport E/L de 0,60 et d'un rapport OPP/L de 0,5.

Au tableau 6.7 on donne les valeurs estimées par l'équation et les valeurs mesurées en laboratoire. Comme pour les temps Vebe, on voit que les estimations faites par le modèle sont très proches des valeurs mesurées en laboratoire.

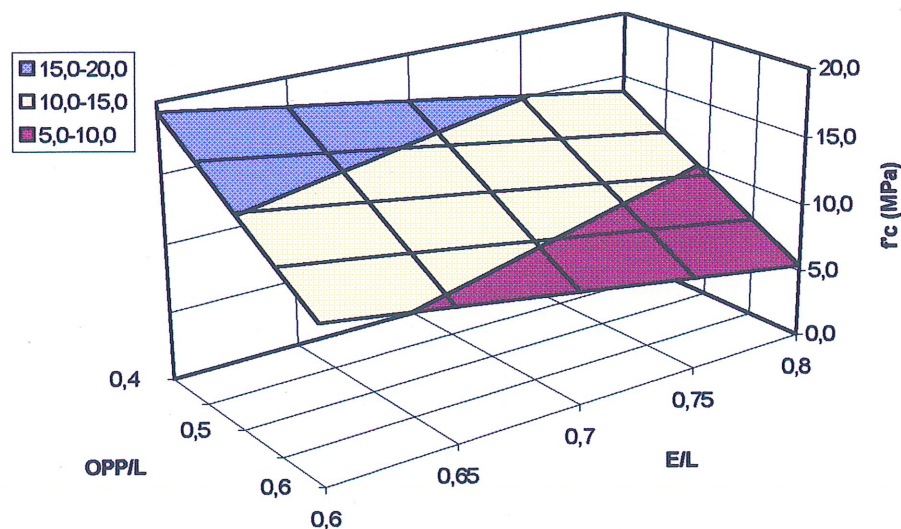


Figure 6.10 Isoréponses - f<sub>c</sub>



TABLEAU 6.7 VALEURS ESTIMÉES ET VALEURS MESURÉES -  $f_c$ 

$f_c$ mesurée (MPa)	$f_c$ estimée (MPa)	Écart (MPa)
19,5	19,3	0,2
21,2	19,3	1,9
12,9	13,7	0,8
12,4	13,7	1,3
11,6	10,9	0,7
8,1	10,9	2,8
6,9	5,4	1,5
6,0	5,4	0,6

### C) Résistance à la traction

Comme pour la résistance à la compression, les variables qui ont un effet sur la résistance à la traction sont le pourcentage d'OPP et le rapport eau/liant. L'équation obtenue est donc:

$$Tr = 1,5 - 0,3 x_2 - 0,5 x_3$$

La figure 6.11 montre les courbes isoréponses obtenues à l'aide de cette équation. À l'aide de ce graphique, il est possible de prédire très précisément les résistances à la traction des BCR en fonction de leurs caractéristiques de formulation. Au tableau 6.8 on donne les valeurs estimées par l'équation et les valeurs mesurées en laboratoire. Ici encore, on remarque que les écarts entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées sont très faibles.

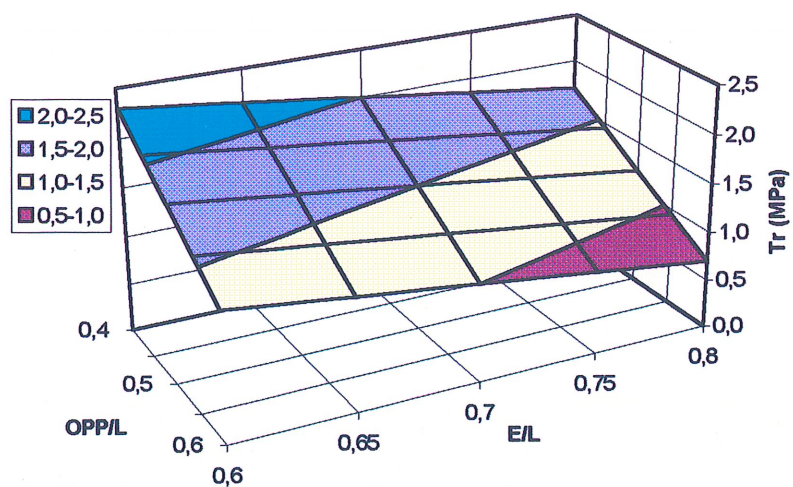


Figure 6.11 Isoréponses - Tr

TABLEAU 6.8 VALEURS ESTIMÉES ET VALEURS MESURÉES - Tr

Tr mesurée (MPa)	Tr estimée (MPa)	Écart (MPa)
2,1	2,3	0,2
2,7	2,3	0,4
1,7	1,7	0
1,5	1,7	0,2
1,4	1,3	0,1
1,0	1,3	0,3
0,8	0,7	0,1
0,8	0,7	0,1

## 6.2 Mélanges avec air entraîné (série 2)

### 6.2.1 Entraînement d'air

Les résultats obtenus pour ce qui est de l'entraînement d'air sont montrés au tableau 6.9. Ce tableau affiche entre autres les pourcentages d'air contenus avant et après ajout d'agent entraîneur d'air (AEA), ainsi que la quantité d'air entraîné ( $\Delta\%$  air). Les dosages en AEA sont également donnés dans ce tableau. L'effet du dosage en entraîneur d'air est montré à la figure 6.12.

TABLEAU 6.9 POURCENTAGE D'AIR DES MÉLANGES (SÉRIE 2)

Mélange	Dosage en AEA (mL/100 kg liant)	Teneur en air avant ajout d'AEA (%)	Teneur en air après ajout d'AEA (%)	$\Delta$ (%)
1a	200	0,8	7,0	6,2
2a	200	1,5	10,5	9,0
1b	100	1,5	6,0	4,5
1c	150	1,0	6,6	5,6

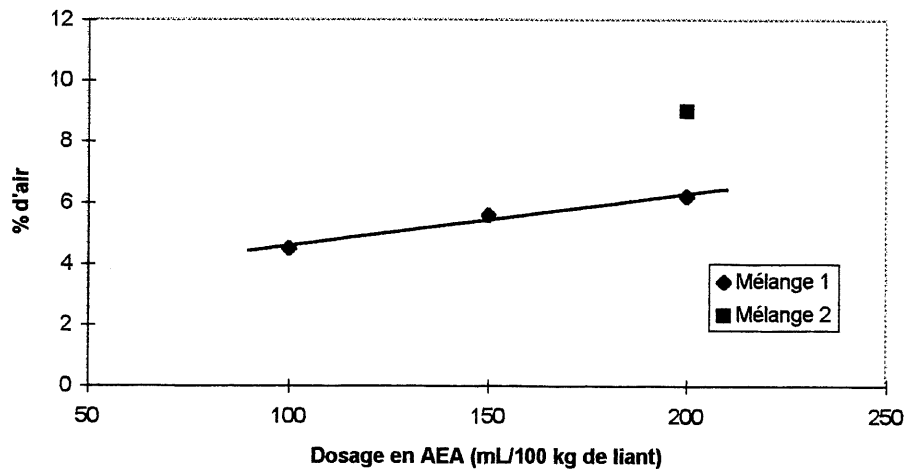


Figure 6.12 Air entraîné en fonction du dosage en AEA

L'effet du dosage en agent entraîneur d'air est évident au tableau 6.9. Plus le dosage est élevé, plus il y a d'air entraîné dans le béton. Il est important de noter également qu'il est plus facile d'entraîner de l'air dans un mélange plus fluide, c'est ce que l'on constate en comparant les mélanges A1 et A2 qui ont le même dosage en AEA. Le mélange A2 est plus fluide et le pourcentage d'air entraîné est de 9,0 % comparativement à 6,2 % pour le mélange A1 à un dosage équivalent.

### 6.2.2 Temps Vebe

Les mélanges de cette série ont été fabriqués afin de montrer qu'il est possible d'entraîner de l'air dans les BCR et ainsi d'améliorer leur maniabilité. Les temps Vebe obtenus sont donnés au tableau 6.10, ainsi que le volume de pâte de chaque mélange et les rapports volume de pâte/volume des vides ( $V_{pa}/V_{vc}$ ).  $V_{pa}$  correspond au volume de ciment, d'OPP et d'eau, plus le volume d'air mesuré par la méthode de pression d'air. À la figure 6.13 on peut voir l'effet du pourcentage d'air sur le temps Vebe mesuré pour les mélanges 1 et 2. Quant à la figure 6.14 elle montre l'influence des rapports  $V_p/V_{vc}$  (série 1) et  $V_{pa}/V_{vc}$  (série 2) sur la consistance du béton.

TABLEAU 6.10 TEMPS VEBE (SÉRIE 2)

Mélange	Temps Vebe avant ajout d'AEA (s)	Temps Vebe après ajout d'AEA (s)	$V_{pa}$ (L/m <sup>3</sup> )	$V_{pa}/V_{vc}$
A1	50-60	9	219	1,20
A2	10-15	1	269	1,47
A3	57	19	216	1,18
A4	54	10	217	1,19

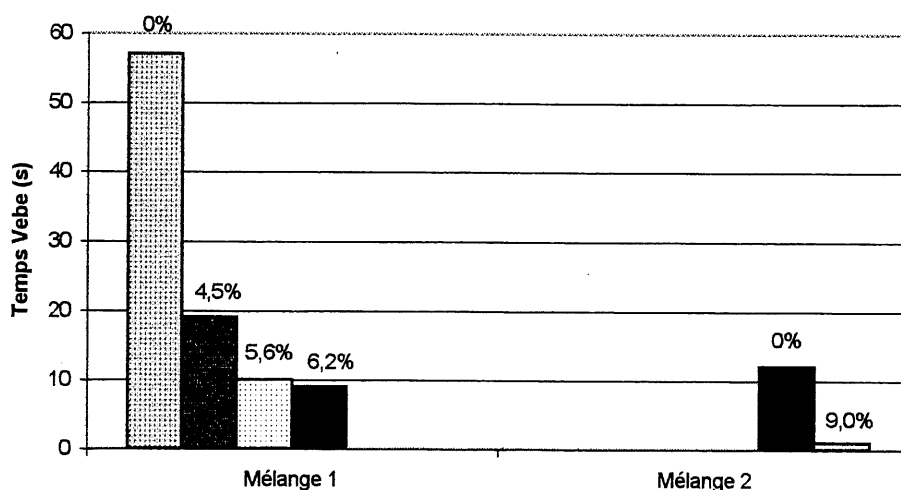


Figure 6.13 Effet du pourcentage d'air entraîné sur le temps Vebe

Il est évident au tableau 6.10 que le fait d'ajouter de l'AEA au BCR est favorable pour sa maniabilité lorsque le mélange est sec car le temps Vebe passe alors de 57 s à 9 s pour une dose d'AEA double de celle qui est recommandée (mélange A1). Lorsque le BCR a déjà un temps Vebe assez faible, l'effet d'un ajout d'AEA est moins prononcé. Le temps Vebe passe ici de 12 s à 1 s (mélange A2). Par ailleurs, en doublant la dose d'AEA on ne gagne que 1,7 % d'air. Par contre on gagne 9 secondes sur le temps Vebe. À la figure 6.13 on peut voir qu'au-delà d'un certain volume d'air entraîné (environ 5%), l'entraînement supplémentaire d'air n'améliore que très peu la maniabilité. La figure 6.14 quant à elle, montre l'effet de l'air entraîné sur le temps Vebe en comparant les temps Vebe obtenus avec et sans entraînement d'air. On remarque que la tendance

est la même avec ou sans AEA mais que pour le rapport  $V_{pa}/V_{vc}$  la courbe est décalée vers la droite.

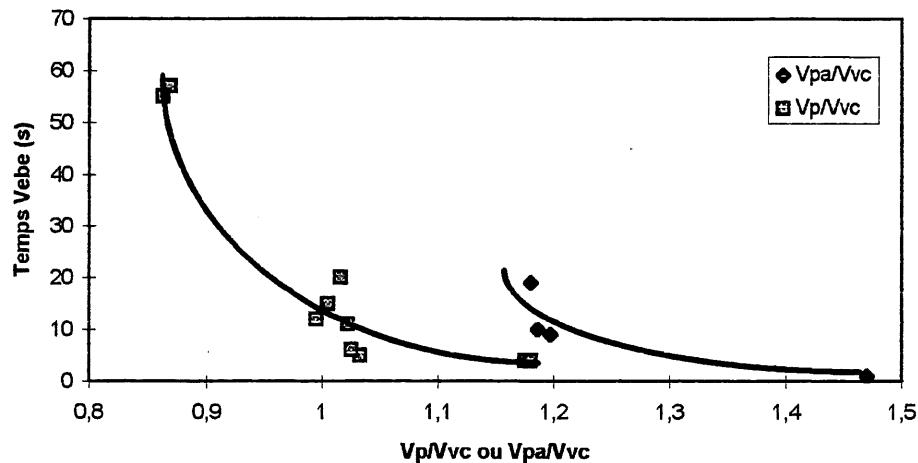


Figure 6.14 Temps Vebe en fonction de  $V_p/V_{vc}$  et  $V_{pa}/V_{vc}$

Selon les résultats de LEPAGE [1996], le rapport  $V_{pa}/V_{vc}$  des BCR avec air entraîné doit être calculé en incluant dans  $V_{pa}$  le volume de l'air entraîné moins  $25 \text{ L/m}^3$ . Ce dernier volume correspond approximativement au volume des plus grosses bulles d'air entrappé. Selon cette approche on voit bien qu'il existe alors une relation unique entre le temps Vebe et le rapport Volume de pâte/volume des vides de compactage des BCR avec et sans air entraîné.

### 6.2.3 Résistance à la compression

Les résistances à la compression à 28 et 91 jours sont montrées au tableau 6.11. L'influence de la teneur en air d'un mélange sur la résistance à la compression est montrée à la figure 6.15.

TABLEAU 6.11 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION (SÉRIE 2)

Résistance à la compression (MPa)									
Mélange	% air	28 jours				91 jours			
		1	2	3	moy	1	2	3	moy
1a	7,0	7,9	8,1	8,0	8,0	14,7	14,6	14,7	14,7
2a	10,5	5,5	5,2	5,3	5,3	11,8	10,9	11,5	11,4
1b	6,0	11,1	11,6	10,8	11,2	17,3	17,4	17,8	17,5
1c	6,6	10,4	10,4	10,3	10,4	16,0	15,7	16,8	16,2

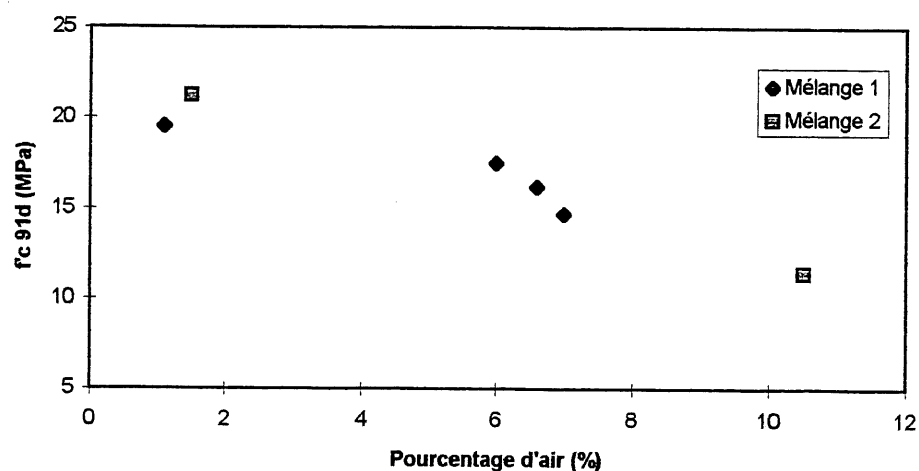


Figure 6.15 Influence du pourcentage d'air sur la résistance à la compression à 91 jours

On remarque au tableau 6.11 que plus le pourcentage d'air est grand, plus sa résistance à la compression est faible. En gros, pour 1% d'air entraîné supplémentaire on diminue d'environ 5% la résistance à la compression, ce qui correspond au comportement des bétons conventionnels.

### 6.3 Essai pilote

La construction de la planche d'essai a été réalisée en une seule journée à l'aide des équipements de mise en place et de compactage du BCR (une niveleuse et un rouleau compacteur vibrant). La planche est constituée de six couches de BCR d'une épaisseur d'environ 300 mm à 450 mm. La mise en place et la compaction des deux premières couches ont été problématiques en raison d'une fondation très humide et mal compactée. Ces problèmes de fondation ont fait en sorte que la compaction du BCR des trois premières couches a dû être effectuée sans vibration.

Le temps Vebe moyen était de 15 s ce qui correspond au temps Vebe généralement utilisé par Hydro-Québec pour la construction des ouvrages en BCR. À l'exception de quelques livraisons, le BCR avait une excellente maniabilité. Les variations de la maniabilité ont été causées par des variations importantes de l'humidité du sable utilisé. Lorsque nécessaire le dosage en eau du BCR a été rapidement ajusté pour maintenir à environ 15 s le temps Vebe des livraisons subséquentes.

Des thermomètres placés à différents endroits dans la planche d'essai ont permis d'enregistrer l'élévation de température au coeur de l'ouvrage. Une température maximale de 34°C a été atteinte après environ 36 heures suivant la mise en place de la couche centrale. L'élévation maximale de température est de 9°C, ce qui est relativement faible. Les résultats du suivi de température confirment que l'OPP ne provoque pas de dégagement de chaleur néfaste pour la qualité du BCR.

Une série de trois forages a été réalisée à 28 jours et 91 jours après la construction de la planche d'essai. Ces carottages ont permis d'extraire plusieurs éprouvettes cylindriques qui ont été utilisées pour vérifier les caractéristiques mécaniques du BCR mis en place. Les résistances à la compression après 35 jours et 105 jours sont présentées au tableau 6.12 tandis que celles des cylindres fabriqués à l'usine sont montrées au tableau 6.13.



TABLEAU 6.12 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES CYLINDRES CAROTTÉS

f <sub>c</sub> à 35 jours (MPa)					f <sub>c</sub> à 105 jours (MPa)				
couche	1	2	3	moy	couche	1	2	3	moy
bas	15,6	14,7	12,8	14,4	bas	23,0	23,8	17,9	21,6
centre	16,6	14,4	-	15,5	centre	20,9	25,5	24,1	23,5
haut	11,9	13,9	12,7	12,8	haut	17,7	18,3	24,1	20,0

TABLEAU 6.13 RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DES CYLINDRES MOULÉS

f <sub>c</sub> à 35 jours (MPa)					f <sub>c</sub> à 105 jours (MPa)				
couche	1	2	3	moy	couche	1	2	3	moy
bas	15,6	15,6	15,0	15,4	bas	20,9	22,1	21,4	21,5
centre	14,1	14,4	12,4	13,6	centre	19,4	20,9	20,3	20,2
haut	15,2	14,0	14,9	14,7	haut	19,6	19,4	18,7	19,2

Les résultats des tableaux 6.12 et 6.13 montrent que les propriétés mécaniques du BCR de la planche d'essai sont très voisines de celles des cylindres prélevés à l'usine. Ces résultats confirment que, malgré certains problèmes de mise en place, la compaction du BCR a été suffisante pour lui permettre de développer toutes ses propriétés mécaniques.

## 7.0 DISCUSSION

### 7.1 Utilisation du plan factoriel pour la formulation des BCR

Le principal avantage à l'utilisation de cette approche est le petit nombre de mélanges que l'on doit produire. Ceci peut être particulièrement important lorsque les sources de matériaux pour les essais sont limitées. De plus, si les mélanges du plan factoriel ne correspondent pas à nos besoins, l'analyse indique sur quels paramètres de formulation on peut agir pour obtenir un mélange satisfaisant. L'analyse indique aussi comment agir sur ces paramètres; soit en les augmentant ou en les diminuant. Il ne faut cependant pas oublier que les relations obtenues ne sont valables que pour le domaine étudié. Cette approche de formulation peut également être jumelée à une autre méthode. Par exemple, on peut, à l'aide d'une méthode, formuler un BCR qui répond théoriquement à nos besoins et en faire le centre de notre domaine d'étude. Il est aussi pensable de partir d'un mélange connu, comme il a été fait dans ce projet.

Dans cette recherche nous avons choisi d'étudier l'effet de trois variables sur les propriétés des BCR. Il s'est avéré que l'approche des plans d'expérience a permis de formuler des équations mathématiques servant à estimer certaines propriétés des BCR à partir des valeurs de ces trois variables. Il est donc possible de savoir quelle variable affecte telle ou telle autre propriété. Ainsi, des équations pouvant prédire le temps Vebe, la résistance à la compression et la résistance à la traction, ont été obtenues.

## **7.2 Utilisation de l'OPP en remplacement des cendres volantes**

### **7.2.1 Propriétés du béton frais**

L'emploi d'OPP dans les mélanges de BCR, en remplacement du ciment, a peu d'effet sur la maniabilité de ces derniers, et ce, pour un même volume de pâte. De ce fait, une seule relation (temps Vebe en fonction de  $V_p/V_{ve}$ ) est nécessaire pour fixer la maniabilité du béton indépendamment du pourcentage d'OPP utilisé. On peut donc choisir une teneur en ciment d'un mélange pour obtenir une résistance voulue, puis ajuster le volume de pâte, donc la maniabilité, en ajoutant plus ou moins d'OPP.

Les économies faites en employant de l'OPP dans les BCR à la place des cendres volantes sont également un incitatif à leur utilisation. À l'heure actuelle lorsqu'on désire ajuster la maniabilité d'un BCR on choisi souvent d'ajouter de l'eau au mélange car le ciment et les cendres volantes sont très coûteuses. Cette action a comme conséquence d'augmenter le rapport E/C et le risque de retrait. Par contre, dans un BCR avec OPP il peut s'avérer plus économique d'augmenter la quantité d'OPP au lieu de l'eau en vue de garder un rapport E/C qui nous permettra d'obtenir les caractéristiques physiques et mécaniques voulues.

### **7.2.2 Propriétés du béton durci**

Pour un même pourcentage de remplacement, on obtient des résistances légèrement inférieures lorsque l'on utilise de l'OPP plutôt que des cendres volantes. Il faut donc utiliser une proportion de ciment légèrement plus élevée lorsqu'on utilise de l'OPP pour garder un niveau de résistance équivalent. Il est également envisageable de diminuer le rapport E/L pour obtenir le même résultat. Même en employant une plus grande proportion de ciment dans le mélange, le BCR avec OPP est plus économique vu le faible coût de l'OPP par rapport aux cendres volantes (achat et transport).

Pour ce qui est de la perméabilité, on peut voir que le facteur déterminant est la résistance à la compression du BCR produit. Il est certain que le pourcentage d'OPP et la teneur en liant du mélange ont une influence sur la perméabilité puisqu'ils affectent également la résistance à la compression. Il suffit alors de formuler le BCR en fonction de sa résistance pour obtenir une perméabilité adéquate. Dans le cadre de cette recherche, les BCR ayant une résistance à la compression supérieure à 10 MPa ont une perméabilité satisfaisante pour leur utilisation dans les barrages.

Par ailleurs, l'OPP offre aussi un avantage pour ce qui est du dégagement de chaleur. Puisqu'il est légèrement moins réactif que les cendres volantes, il produit également un moins grand dégagement de chaleur. Il peut donc s'avérer avantageux de l'utiliser dans les cas où ce facteur doit être contrôlé étroitement.

### **7.3 Entraînement d'air dans les BCR avec OPP**

Contrairement aux BCR contenant des cendres volantes, ceux qui sont faits avec de l'OPP ne semblent pas avoir de problème d'entraînement d'air. Une dose d'agent entraîneur d'air normalement employée pour les bétons secs suffit à entraîner de l'air dans ces BCR. De plus, il semble favorable d'entraîner de l'air dans les BCR qui ont un temps Vebe relativement élevé ( $> 45$  s) car l'effet sur les propriétés du béton durci est moins prononcé. C'est-à-dire que la résistance à la compression diminue moins que pour un BCR plus maniable. Ce phénomène s'explique particulièrement par une meilleure compaction du béton vu l'amélioration de sa maniabilité (dans le cas du béton sec). De plus, un BCR ayant déjà une bonne maniabilité avant entraînement d'air devient trop fluide pour être mis en place à l'aide des équipements normalement employés pour le BCR. Il semble cependant que, pour les paramètres étudiés, l'effet bénéfique de l'entraînement d'air se limite à des pourcentages inférieurs à 6% car, au-delà de cette valeur, la chute de résistance est très importante.

## CONCLUSION

Ce projet avait pour objectifs de vérifier la possibilité d'utiliser de l'OPP en remplacement des cendres volantes dans les BCR pour barrages et de valider une nouvelle approche de formulation basée sur la théorie des plans d'expériences. Pour ce faire nous avons étudié l'effet d'une variation de la teneur en liant, du pourcentage d'OPP utilisé et du rapport E/L. Les propriétés étudiées sont:

- la maniabilité (temps Vebe)
- la résistance à la compression et à la traction
- le dégagement de chaleur
- la perméabilité à l'eau

Notre étude nous a permis de tirer les conclusions suivantes:

1. Il est possible de produire des BCR pour barrages avec de l'OPP au lieu des cendres volantes. Les pourcentages de remplacement, pour obtenir les propriétés désirées, ne sont pas les mêmes pour l'OPP que pour les cendres volantes. On doit mettre environ 40% d'OPP dans un mélange pour obtenir des propriétés semblables à un béton contenant 50% de cendres volantes.
2. L'OPP se montre particulièrement intéressant pour ajuster la maniabilité des BCR. Puisque c'est la quantité de pâte qui influence le plus la maniabilité on a le choix d'utiliser l'OPP au lieu du ciment pour augmenter cette quantité et ainsi économiser substantiellement sur le coût du mélange tout en conservant des propriétés physiques équivalentes.
3. Il semble relativement facile d'entraîner de l'air dans les BCR avec OPP; ce qui n'est généralement pas le cas pour les BCR avec cendres volantes. D'ailleurs, les bétons de consistance plus sèche montrent une amélioration des propriétés du béton frais sans grand effet sur les propriétés du béton durci, et ce, jusqu'à des pourcentage d'air d'environ 6%. Par contre, un BCR ayant une bonne maniabilité avant entraînement d'air devient trop fluide pour être mis en place à l'aide des équipements normalement employés pour le BCR.

4. L'utilisation du plan factoriel s'avère une bonne alternative pour la formulation des BCR. Cette méthode, en plus de demander peu de mélanges, permet d'estimer les propriétés d'un mélange étant compris dans notre domaine d'étude.

5. Un essai en chantier a montré qu'il est relativement facile de produire en usine et d'utiliser en chantier un BCR avec OPP formulé en laboratoire.

Il serait intéressant d'étudier de façon plus précise l'effet de la courbe granulométrique choisie sur les propriétés du béton frais et, surtout, sur l'entraînement d'air. D'autres études devraient aussi être basées sur la théorie des plans d'expérience afin de confirmer les conclusions tirées dans ce projet. Par contre, il serait préférable de faire au moins deux mélanges pour chaque formulation afin d'obtenir plus de précision sur l'erreur et donc sur les équations mathématiques qui découlent de l'analyse factorielle.

## RÉFÉRENCES

---

ACI Committee Report 207.5R (1989) *Roller Compacted Mass Concrete*, 46 p.

ANDERSSON, R. (1987) *Swedish Experiences with RCC*, Concrete International, vol. 9, no 2, p. 18-24.

ARJOUAN, M., CHRAIBI, A.F., EJJAOUANI, H. (1988) *Utilisation du béton compacté au rouleau dans les barrages de faible importance: cas du barrage de Rwedat*, Seizième Congrès des Grands Barrages, San Francisco, p. 635-652.

ARNOLD, T.E., FELDSHER, T.B., HANSEN, K.D. (1992) *RCC test specimen preparation. Developments toward a standard method*, Roller Compacted Concrete III, New York, p. 341-357.

BANTHIA, N., PIGEON, M., MARCHAND, J., BOISVERT, J. (1992) *Permeability of Roller Compacted Concrete*, ASCE Materials Journal, 23 p.

BOUYGE, B., GARNIER, G., JENSEN, A., MARTIN, J., STERENBERG, J. (1988) *Construction et contrôle d'un barrage en béton compacté au rouleau (BCR): un travail d'équipe*, Seizième Congrès des Grands Barrages, San Francisco, p. 589-612.

DELAGRAVE, A. (1992) *Résistance au gel-dégel du bcr pour les barrages*, Thèse de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences et de génie, Université Laval.

DELAGRAVE, A., MARCHAND, J., PIGEON, M., RANC, R., MARZIN, J. (1994) *Résistance au gel-dégel du béton compacté au rouleau pour les barrages à base de liant Rolac*, Materials and structures, vol. 27, p. 26-32.

DUNSTAN, M.R.H. (1988) *Design and construction considerations for roller-compacted concrete dams*, Seizième Congrès des Grands Barrages, San Francisco, p. 453-467.

FORBES, B. A. (1988) *The development and testing of roller compacted concrete for dams in Australia*, Seizième Congrès des Grands Barrages, San Francisco, p. 89-117.

GUIRAUD, H., PIGEON, M. (1994) *Compréhension du comportement au gel des bétons compactés au rouleau*, Atelier scientifique international sur les bétons compactés au rouleau, Sainte-Foy, p.141-155.

HANSEN, K.D., REIMHARDT, W.G. (1991) *Roller-Compacted Concrete Dams*, États-Unis, M<sup>c</sup>Graw-Hill, 298 p.

HOLLINGWORTH, F., DRUYTS, F.H.W.M., MAARTENS, W.W. (1988) *Some South African experiences in the design and construction of rollcrete dams*, Seizième Congrès des Grands Barrages, San Francisco, p. 33-52.

HAQUE, M.N., WARD, M.A. (1986) *Marginal materials in roller compacted concrete for pavement construction*, ACI Journal, vol. 83, p. 674-679.

LAMOTHE, P. (1995) *Étude de la réactivité des fines de l'OPP*, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke.

LEPAGE, S. (1996) *Méthodes de formulation et propriétés des bétons compactés au rouleau produits par l'ajout d'un coulis dans un mélange granulaire*, thèse de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke.

MARCHAND, J., BOISVERT, L., TREMBLAY, S., MALTAIS, J., PIGEON, M. (1994) *Air entrainment in dry concrete mixtures*, Atelier scientifique international sur les bétons compactés au rouleau, Sainte-Foy, p. 83-99.

PENDERGAST, J. (1992) *RCC at 10*, Civil Engineering, vol. 62, no 10, p.44-47.

PERRATON, D., AÏTCIN, P.C., VÉZINA, D. (1988) *Permeabilities of silica fume concrete*, ACI Special publication SP-108, Detroit, p. 63-84.

RAGAN, S.A. (1986) *Evaluation of the frost resistance of roller-compacted concrete pavements*, Miscellaneous paper SL-86-16, US Corps of Engineers.

SHRADER, E.K. (1982) *The First Concrete Gravity Dam Designed and Built for Roller Compacted Construction Methods*, Concrete International, p. 15-24.

SHRADER, E.K. (1985) *Water Tightness and seepage Control in RCC Dams*, ASCE.

SHRADER, E.K. (1994) *Fracture and Material Properties of Roller Compacted Concrete*, Poc. of V.M. Malhotra Symposium Concrete Technology: Past, Present and Future, ACI SP 144, P.K. Mehta ed, p. 325-347.

TAYABJI, S.D., OKAMOTO, P.A. (s.d.) *Engineering Properties of Roller-Compacted Concrete*, Transportation Research Record 1136, p. 33-45.

TATRO, S., HINDS, J.K. (1992) *Roller compacted mix design*, 3rd ASCE Specialty Conference on Roller Compacted Concrete, p. 323-340.

WHITING, D. (1985) *Air contents and void characteristics in Low-Slump Dense Concretes*, ACI Journal, vol. 82, no 65, p. 716-723.



## ANNEXE A COURBES DE DÉGAGEMENT DE CHALEUR

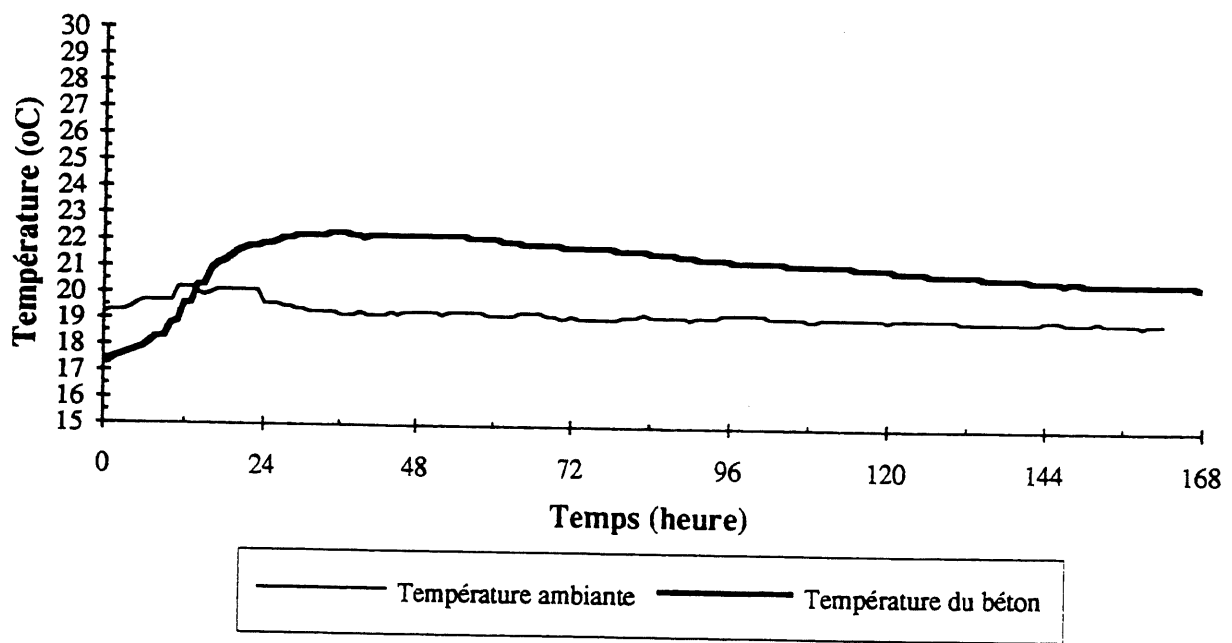
---

Ciment + OPP: 170 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 40%

E/(C+OPP): 0.6

### BCR Essai #1

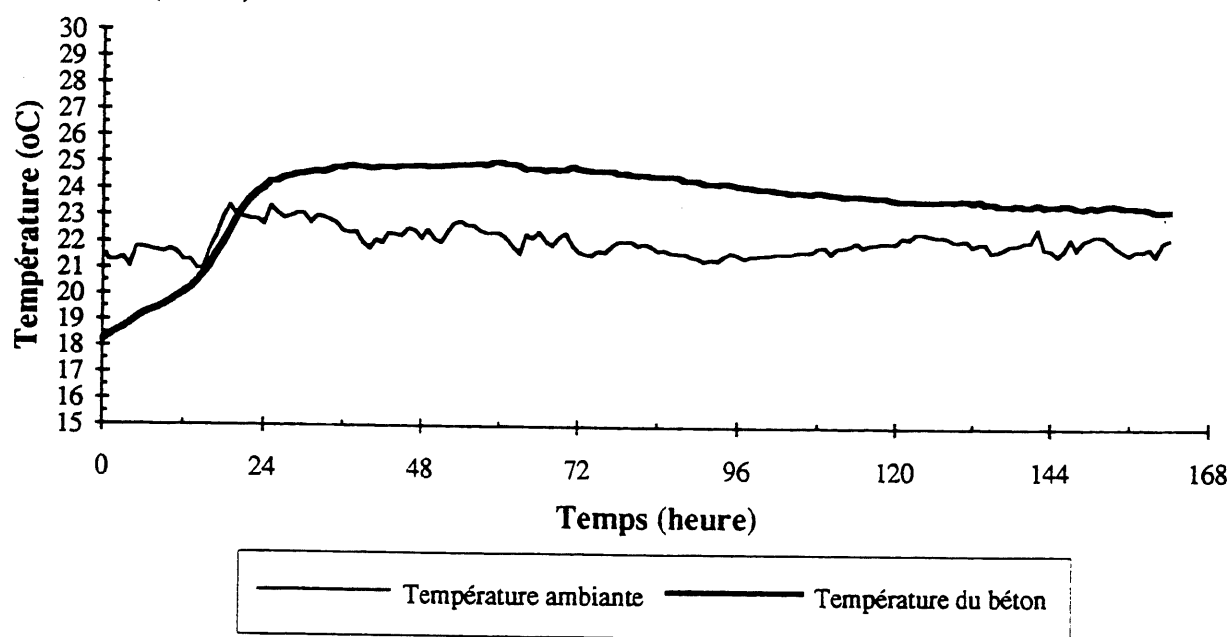


Ciment + OPP: 200 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 40%

E/(C+OPP): 0.6

### BCR Essai #2

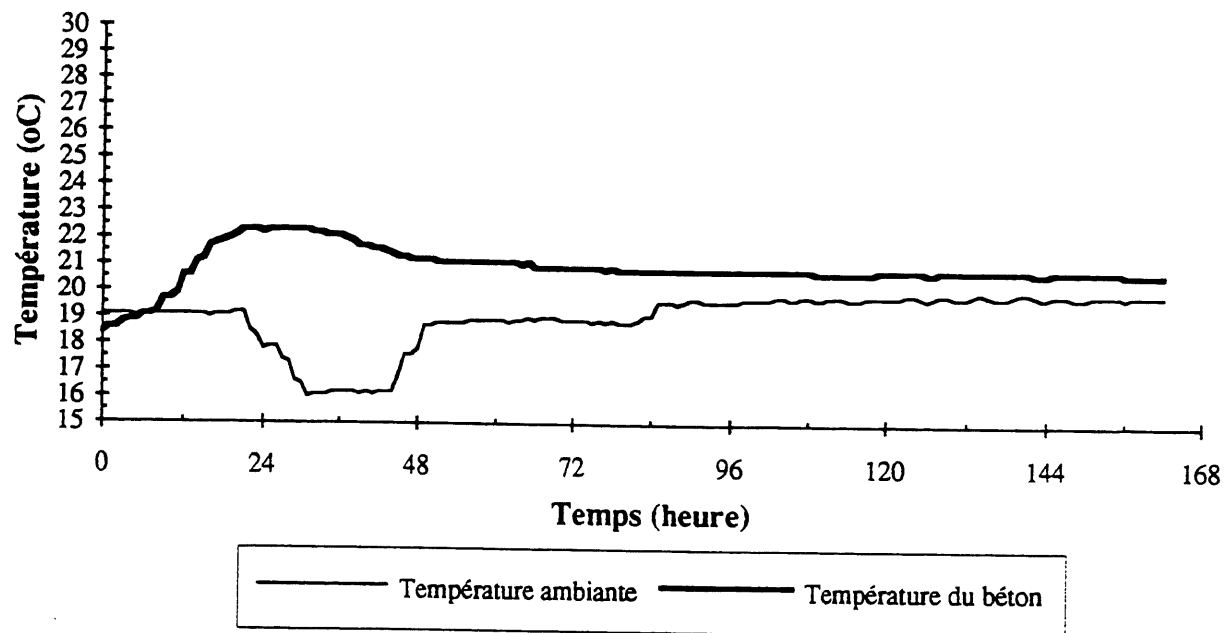


Ciment + OPP: 170 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 40%

E/(C+OPP): 0.8

### BCR Essai #5

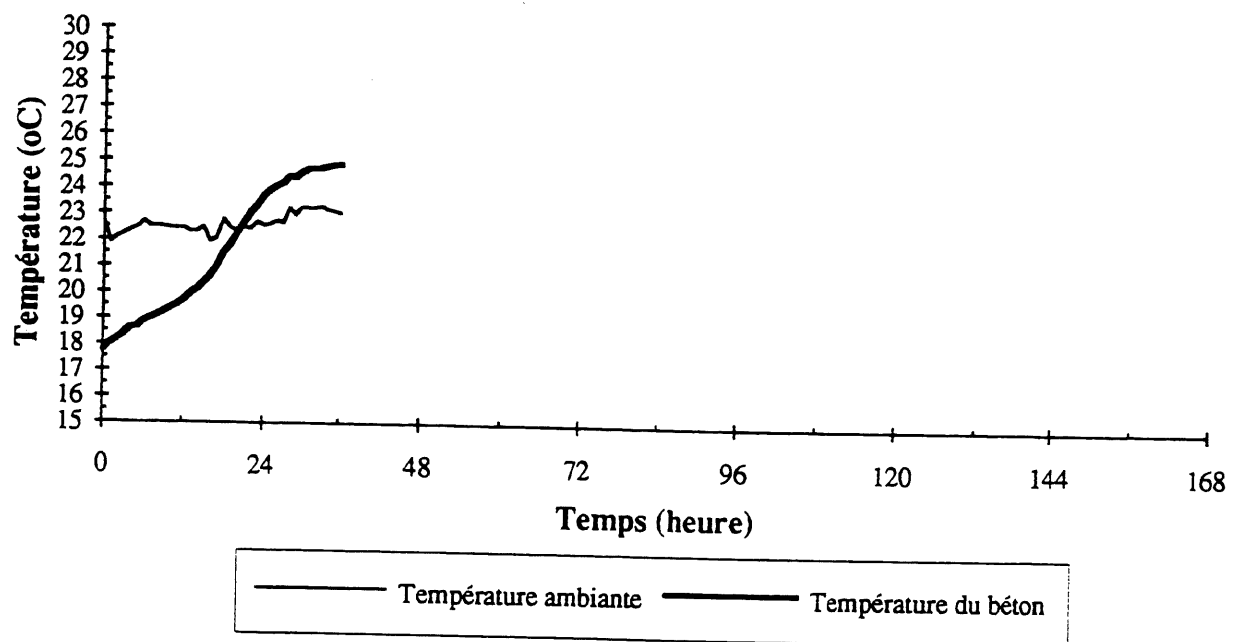


Ciment + OPP: 200 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 40%

E/(C+OPP): 0.8

### BCR Essai #6

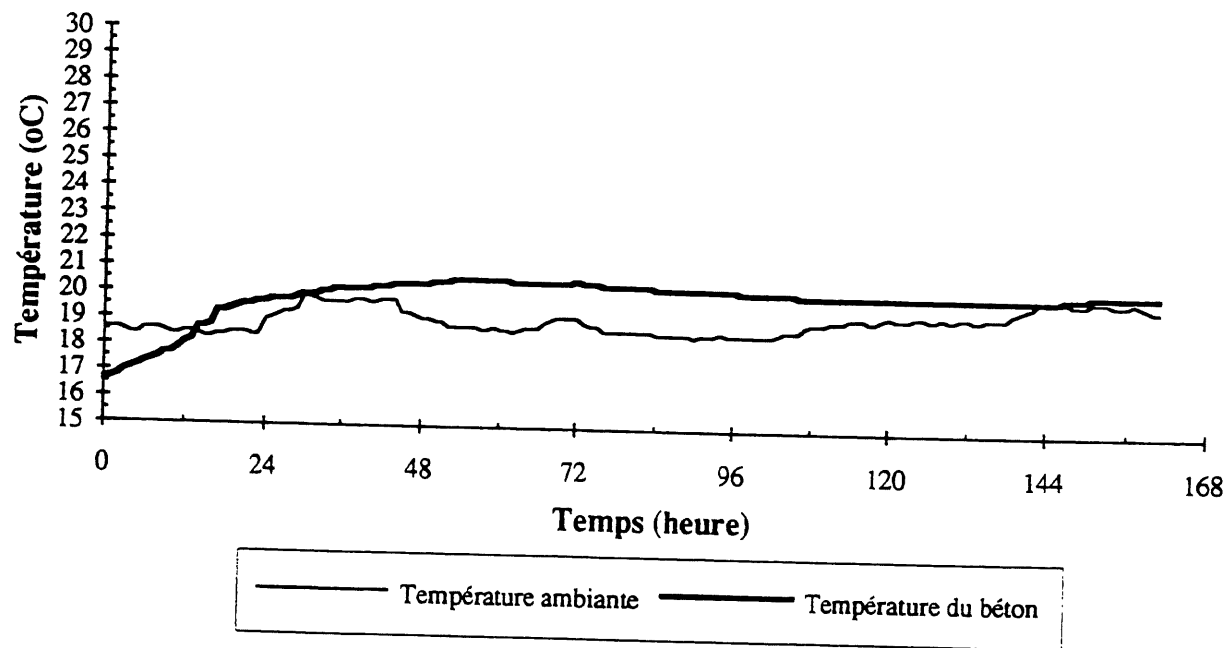


Ciment + OPP: 170 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 60%

E/(C+OPP): 0.8

### BCR Essai #7

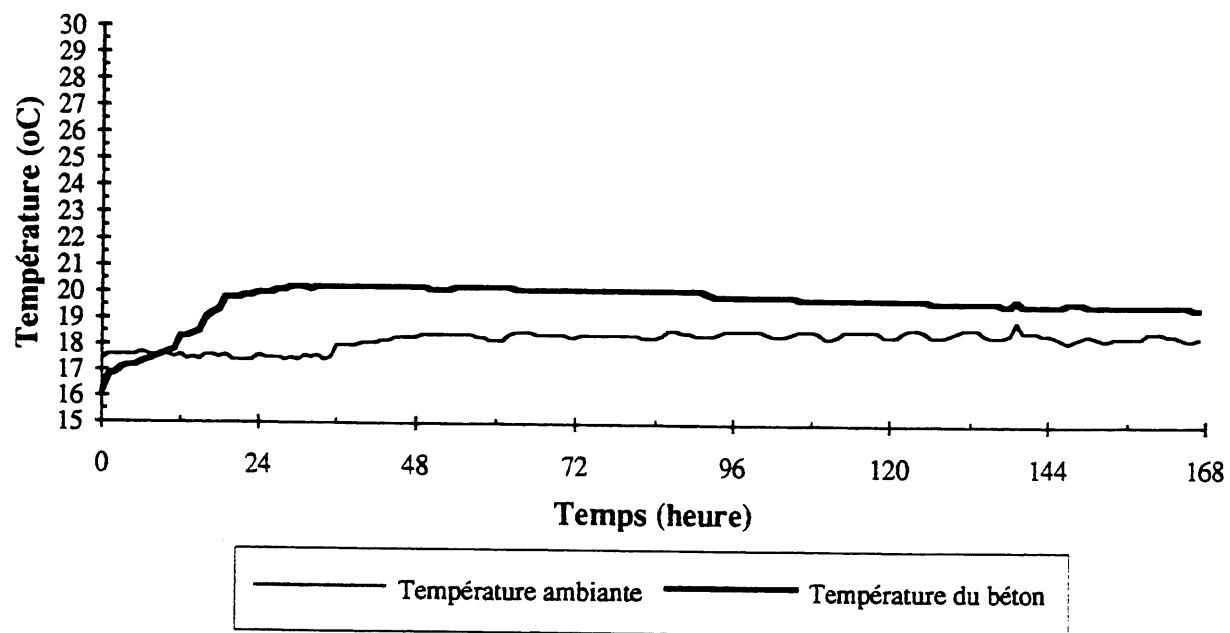


Ciment + OPP: 200 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 60%

E/(C+OPP): 0.8

### BCR Essai #8

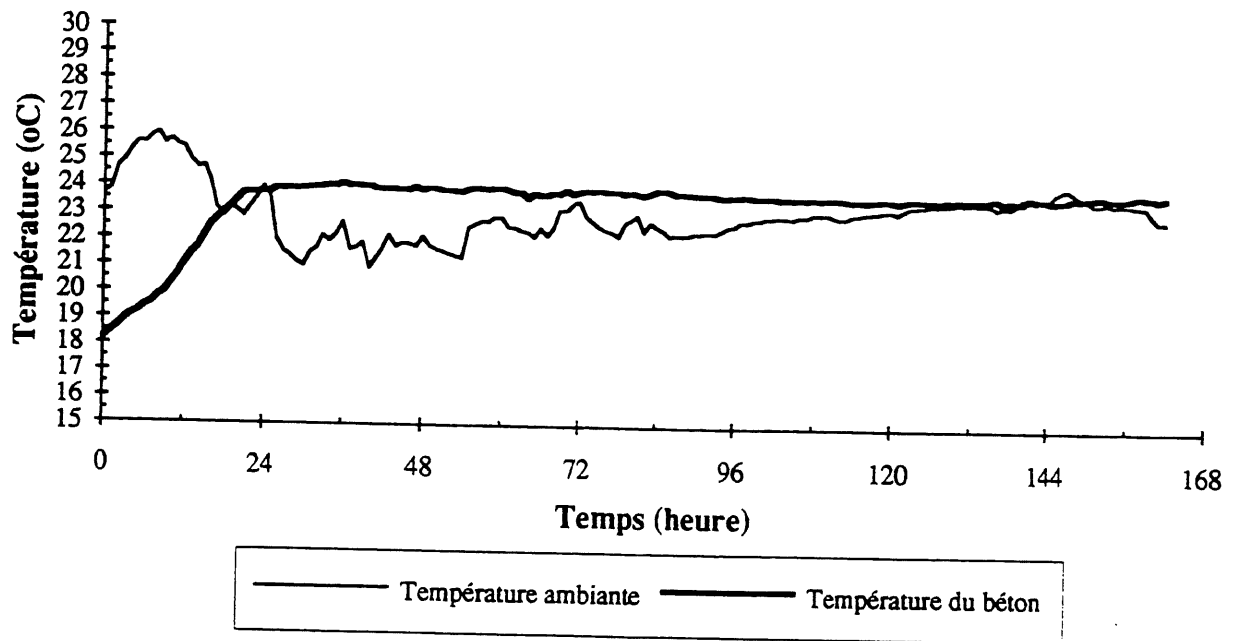


Ciment + OPP: 185 kg/m<sup>3</sup>

OPP/(C+OPP): 50%

E/(C+OPP): 0.7

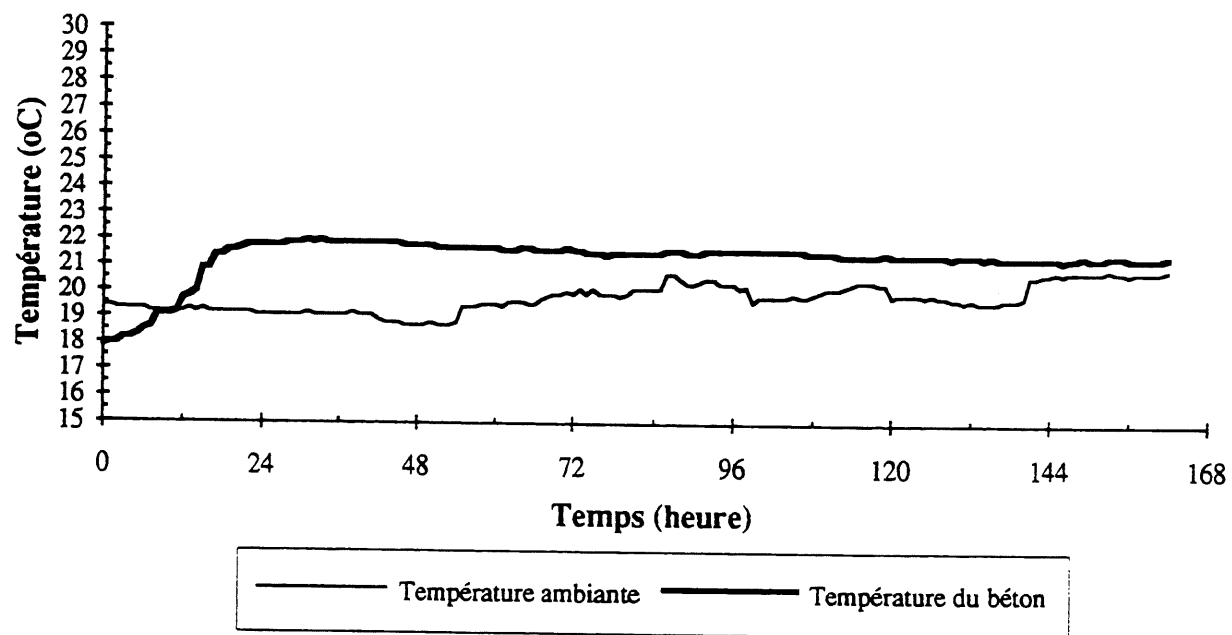
### BCR Essai #9





Ciment + OPP: 185 kg/m<sup>3</sup>  
OPP/(C+OPP): 50%  
E/(C+OPP): 0.7

### BCR Essai #10



## ANNEXE B ANALYSE FACTORIELLE

Le logiciel Statpac a servi à calculer les effets des trois variables étudiées (teneur en liant, pourcentage d'OPP, rapport eau/liant). Dans les calculs présentés dans les pages suivantes, l'effet produit par la variation de la teneur en liant est identifié par la lettre A, celui produit par la variation du pourcentage d'OPP correspond à la lettre B et la lettre C donne l'effet d'un changement du rapport eau/liant. Pour que l'analyse factorielle donne des équations représentatives, certaines hypothèses doivent être rencontrées. Ces hypothèses, ainsi que les critères de vérification sont présentés ici bas. De plus, normalement on a au moins deux valeurs à chaque point alors que nous n'en avons qu'une seule. L'erreur qui doit être ordinairement calculée par le logiciel ne peut être évaluée dans notre cas car il n'y a plus de degré de liberté de disponible pour faire le calcul. Il faudra donc calculer l'erreur à partir des effets négligeables. Les équations mathématiques représentant les relations sont données sous la forme:

$$\text{valeur lissée} = \text{cste} + A/2 x_1 + B/2 x_2 + C/2 x_3 + AB/2 x_1 x_2 + AC/2 x_1 x_3 + BC/2 x_2 x_3 + ABC/2 x_1 x_2 x_3.$$

Dans ces équations, la constante est en fait la moyenne des mesures et les "x" représentent le niveaux des variables, -1 à +1 (voir tableau 4.1).

Hypothèse	Critère de vérification
• les erreurs sont distribuées de façon normale	⇒ droite sur le graphique des résidus vs ordre normal
• indépendance des variables	⇒ points éparpillés sur le graphique résidus vs ordre des mesures
• la variance est constante	⇒ points éparpillés sur le graphique des résidus vs les valeurs lissées

### Temps Vebe

Les résultats de l'analyse à l'aide de Statpac sont montrés à la figure B.1. On peut voir que A, C et AC ont un effet marqué. Les autres effets servent à calculer les erreurs. L'analyse de variance est donnée au tableau suivant.

EFFETS	SS	DL	MS	F <sub>0</sub>
A	968	1	968	553,14*
C	1800	1	1800	1028,57*
AC	840,5	1	840,5	480,29*
erreur	7	4	1,75	
total	3615,5	7		

\* significatif à 5%

À partir des données de la figure B.1, on pose comme équation:

$$\text{Vebe} = 19,75 - 11x_1 - 15x_3 + 10,25 x_1x_3$$

On a donc

Vebe mesuré	valeur lissée	résidu	rang	P=(rang-0,5)/8
12	13,5	-1,5	1	0,06
4	4	0	4	0,44
15	13,5	1,5	8	0,94
55	56	-1	2	0,19
4	4	0	5	0,56
6	5,5	0,5	6	0,69
57	56	1	7	0,81
5	5,5	-0,5	3	0,31

Vérification des hypothèses:

- 1) fig. B.2 → hypothèse vérifiée
- 2) les Vebe mesurés sont dans l'ordre dans le tableau, on voit qu'il n'y a pas d'ordre dans les résidus
- 3) fig. B.3 → hypothèse vérifiée

Notre modèle est bon car toutes les hypothèses sont vérifiées. Selon le modèle, au centre on doit avoir un Vebe de 19,75. On a mesuré 20 s et 11 s en laboratoire.

### Perméabilité

La figure B.4 montre que la perméabilité est influencée par le pourcentage d'OPP et le rapport E/L. Suite à une première analyse de variance, il s'est avéré que les conditions nécessaires à l'acceptation du modèle mathématique tiré des perméabilités mesurées n'étaient pas toutes rencontrées. En effet, l'analyse de variance faite à partir des données de la figure B.4, a démontré que la variance n'était pas constante mais augmentait plutôt lorsque la perméabilité augmentait. Dans ce cas, il est possible de transformer les données brutes de façon à obtenir un modèle représentatif. Pour savoir quelle transformation effectuer, il faut tracer le graphique "ln valeurs mesurées vs ln écart type" et en déterminer la pente. La transformation à faire sera  $y^* = y^\lambda$  où  $\lambda = 1 - \text{pente}$ . On peut obtenir cette valeur de façon mathématique. C'est de cette façon qu'il a été choisi de fonctionner. Afin de pouvoir faire les calculs il fallait au moins deux valeurs de perméabilité à chaque point. On a donc pris chaque valeur de cylindre testé, y compris ceux des mélanges 9 et 10. Voici les données et les calculs:

Mélange	cylindre 1	cylindre 2	moyenne	variance	écart-type
1	6,3	5,5	5,9	0,32	0,57
2	5,3	4,9	5,1	0,08	0,28
3	34,2	24,2	29,2	50	7,07
4	25,0	22,2	23,6	3,92	1,98
5	52,4	46,1	49,3	19,85	4,46
6	40,3	34,3	37,3	18	4,24
7	561	359	460	20402	142,8
8	-	820	820	-	-
9	20,6	24,3	22,5	6,85	2,62
10	19,9	10,9	15,4	40,5	6,36

$x = \ln \text{moyenne}$        $y = \ln \text{écart-type}$       on aura  $y = \beta_1 x + \beta_0$  donc pente =  $\beta_1$

$n = 9$      $\Sigma x = 29,42$     moy  $x = 3,27$      $\Sigma x^2 = 110,1486$      $\Sigma xy = 55,1964$   
           $\Sigma y = 11,52$     moy  $y = 1,28$      $\Sigma y^2 = 39,4998$

$S_{xx} = 110,1486 - 29,42^2/9 = 13,98$        $S_{xy} = 55,1964 - 29,42 \cdot 11,52/9 = 17,54$

$\beta_1 = 17,54/13,98 = 1,25$        $\rightarrow$        $\lambda = 1 - 1,25 = -0,25$

Une nouvelle analyse a donc été faite à partir des valeurs transformées. L'analyse de variance faite à partir des données de la figure B.5 suit.

EFFETS	SS	DL	MS	F <sub>0</sub>
B	$81003,125 \times 10^{-6}$	1	$81003,125 \times 10^{-6}$	260,985*
C	$126253,125 \times 10^{-6}$	1	$126253,125 \times 10^{-6}$	406,776*
BC	$231,125 \times 10^{-6}$	1	$231,125 \times 10^{-6}$	0,745
erreur	$1241,5 \times 10^{-6}$	4	$310,375 \times 10^{-6}$	
total	$208728,875 \times 10^{-6}$	7		

\* significatif à 5%

À partir des données de la figure B.5, on pose comme équation:

$$\text{perméabilité transformée} = 0,422 - 0,1005x_2 - 0,1255x_3$$

On a donc

Perméabilité trans.	valeur lissée	résidu	rang	P=(rang-0,5)/8
0,665	0,648	0,017	7	0,81
0,405	0,397	0,008	6	0,69
0,452	0,447	0,005	5	0,56
0,431	0,447	-0,016	2	0,19
0,187	0,196	-0,009	3	0,31
0,215	0,196	0,019	8	0,94
0,642	0,648	-0,006	4	0,44
0,378	0,397	-0,019	1	0,06

Vérification des hypothèses:

- 1) fig. B.6 → hypothèse vérifiée
- 2) pas d'ordre dans les résidus → hypothèse vérifiée
- 3) fig. B.3 → hypothèse vérifiée

Selon notre modèle, au centre on devrait avoir  $y^* = 0,422$ . En laboratoire on a trouvé  $y^* = 0,508$  et  $0,462$ .

### Résistance à la compression

L'analyse de Statpac montre à la figure B.7 que le pourcentage d'OPP et le rapport E/L ont une influence sur la résistance. Voici les résultats de l'analyse de variance:

EFFETS	SS	DL	MS	F <sub>0</sub>
B	61,605	1	61,605	30,422*
C	139,445	1	139,445	68,862*
BC	9,425	1	9,425	5,65
erreur	8,1	4	2,025	
total	218,575	7		

\* significatif à 5%

On obtient comme modèle l'équation suivante:

$$f_c = 12,325 - 2,775x_2 - 4,175x_3$$

Ce qui donne

f <sub>c</sub> mesurée	valeur lissée	résidu	rang	P=(rang-0,5)/8
21,2	19,275	1,925	8	0,94
8,1	10,9	-2,8	1	0,06
12,4	13,725	-1,325	2	0,19
12,9	12,725	-0,825	3	0,31
6,0	5,375	0,625	5	0,56
6,9	5,375	1,525	7	0,81
19,5	19,275	0,225	4	0,44
11,6	10,9	0,7	6	0,69

Vérification des hypothèses:

- 1) fig. B.8 → hypothèse vérifiée
- 2) pas d'ordre dans les résidus → hypothèse vérifiée
- 3) fig. B.9 → hypothèse vérifiée

Puisque les hypothèses sont vérifiées donc notre modèle est valide. Selon le modèle on devrait avoir au centre 12,325 et on a mesuré 12,0 et 12,9.

#### Résistance à la traction

Comme pour la résistance à la compression, l'analyse factorielle a déterminé que le pourcentage d'OPP et le rapport E/L avaient une influence sur la résistance à la traction. Ceci est montré à la figure B.10. L'analyse de variance est donnée plus bas.

EFFETS	SS	DL	MS	F <sub>0</sub>
B	0,72	1	0,72	10,29*
C	2,0	1	2,0	28,57*
BC	0,08	1	0,08	1,14
erreur	0,28	4	0,07	
total	3,08	7		

\* significatif à 5%

On trouve donc comme relation:

$$Tr = 1,5 - 0,3x_2 - 0,5x_3$$

Ce qui donne

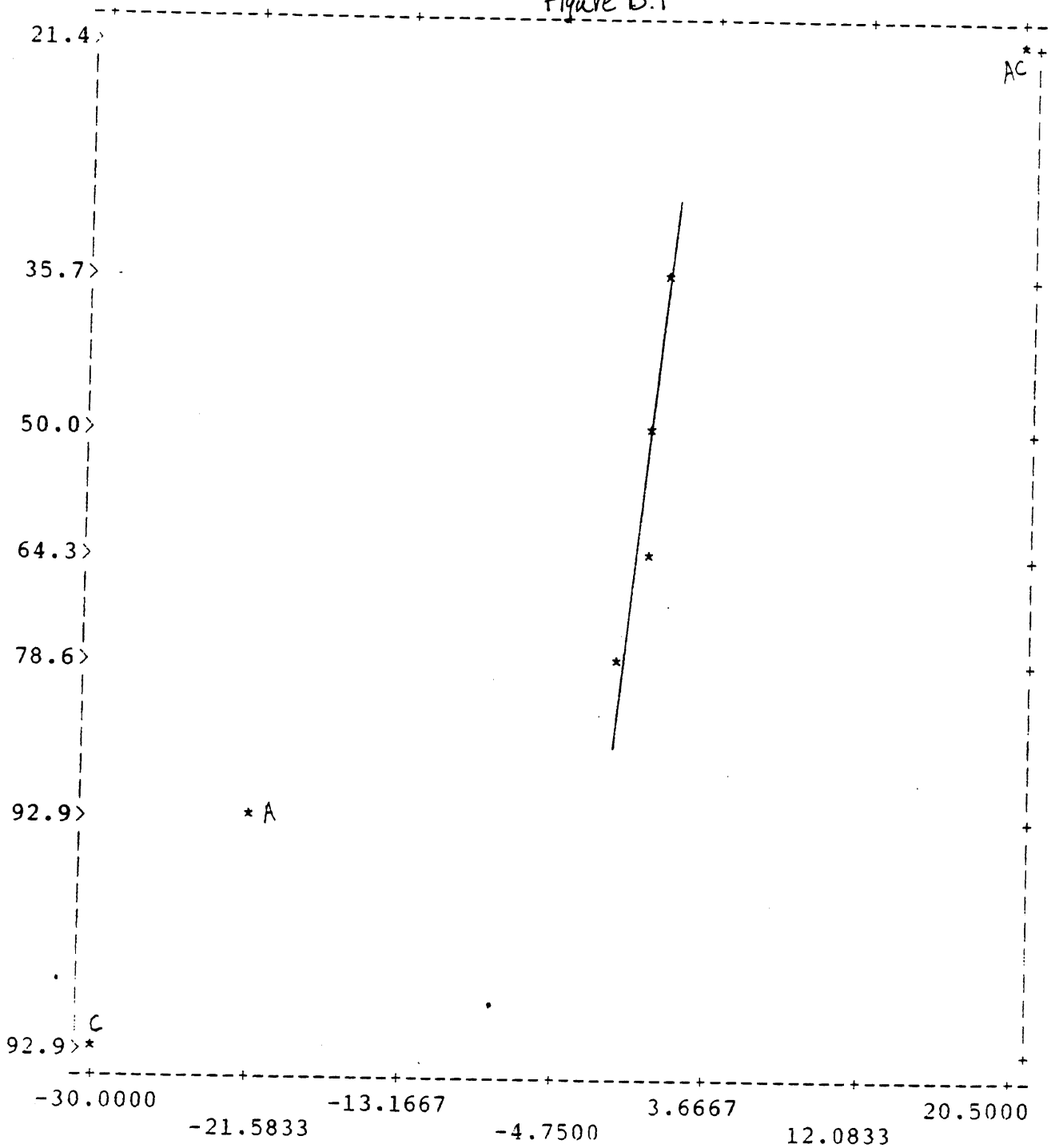
Tr mesurée	valeur lissée	résidu	rang	$P=(rang-0,5)/8$
2,7	2,3	0,3	8	0,94
1,0	1,3	-0,3	1	0,06
1,5	1,7	-0,2	2	0,19
1,7	1,7	0	4	0,44
0,8	0,7	0,1	7	0,81
0,8	0,7	0,1	6	0,69
2,1	2,3	-0,2	3	0,31
1,4	1,3	0,1	5	0,56

Vérification des hypothèses:

- 1) fig.B.11 → hypothèse vérifiée
- 2) les résidus n'ont pas d'ordre particulier → hypothèse vérifiée
- 3) fig.B.9 → hypothèse vérifiée

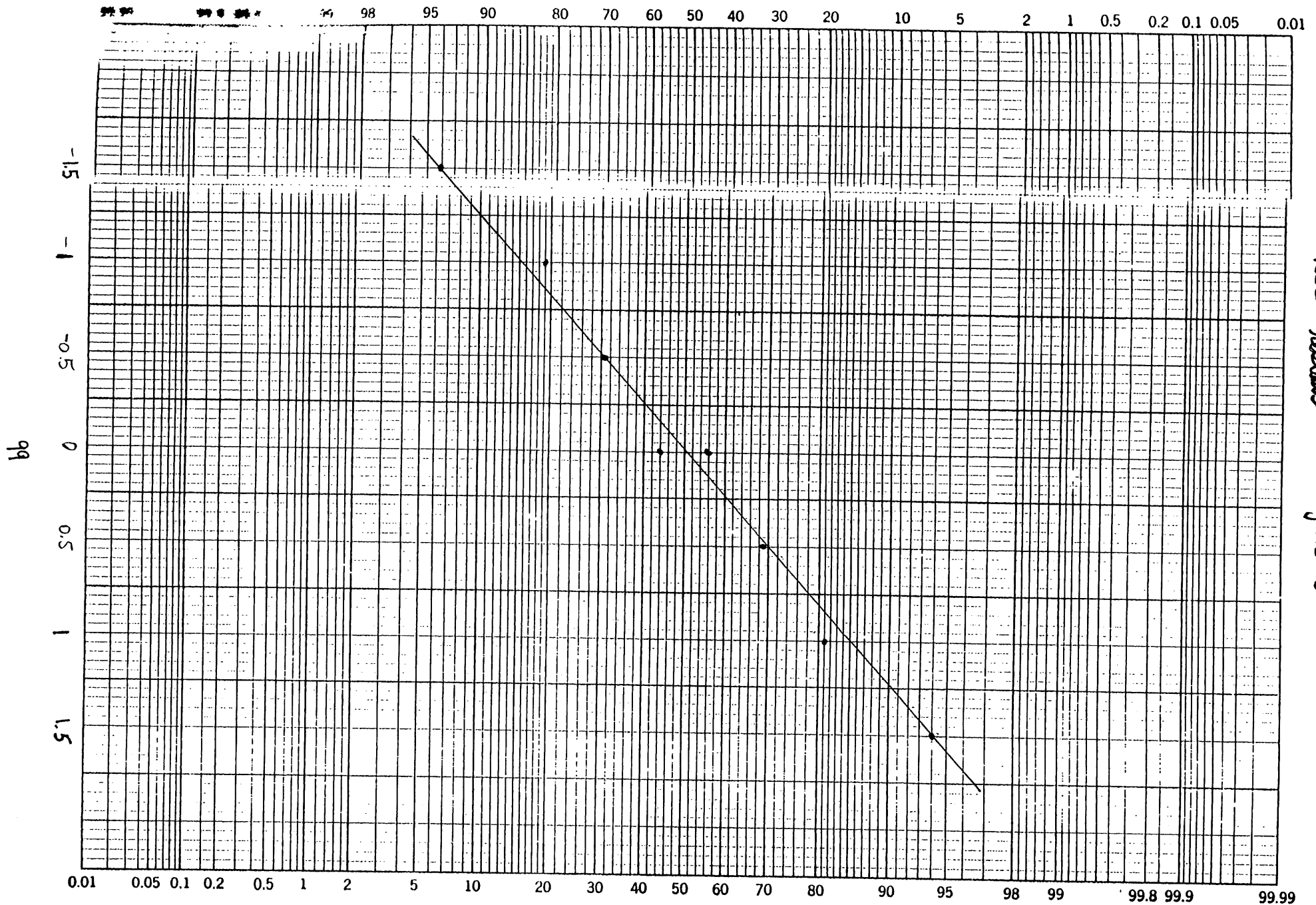
Puisque toutes les hypothèses sont vérifiées, notre modèle est satisfaisant. Selon ce dernier, au centre on devrait avoir 1,5 alors qu'on a mesuré 1,7 et 1,6 en laboratoire.

Figure B.1



OBS	effvebe			SS
	vebe	effvebe		
1	57.000	-22.000	A	968
2	12.000	0.500	B	0.5
3	55.000	1.000	AB	2.0
4	15.000	-30.000	C	1800
5	5.000	20.500	AC	840.5
6	4.000	0.000	BC	0
7	6.000	-1.500	ABC	4.5
8	4.000	-		

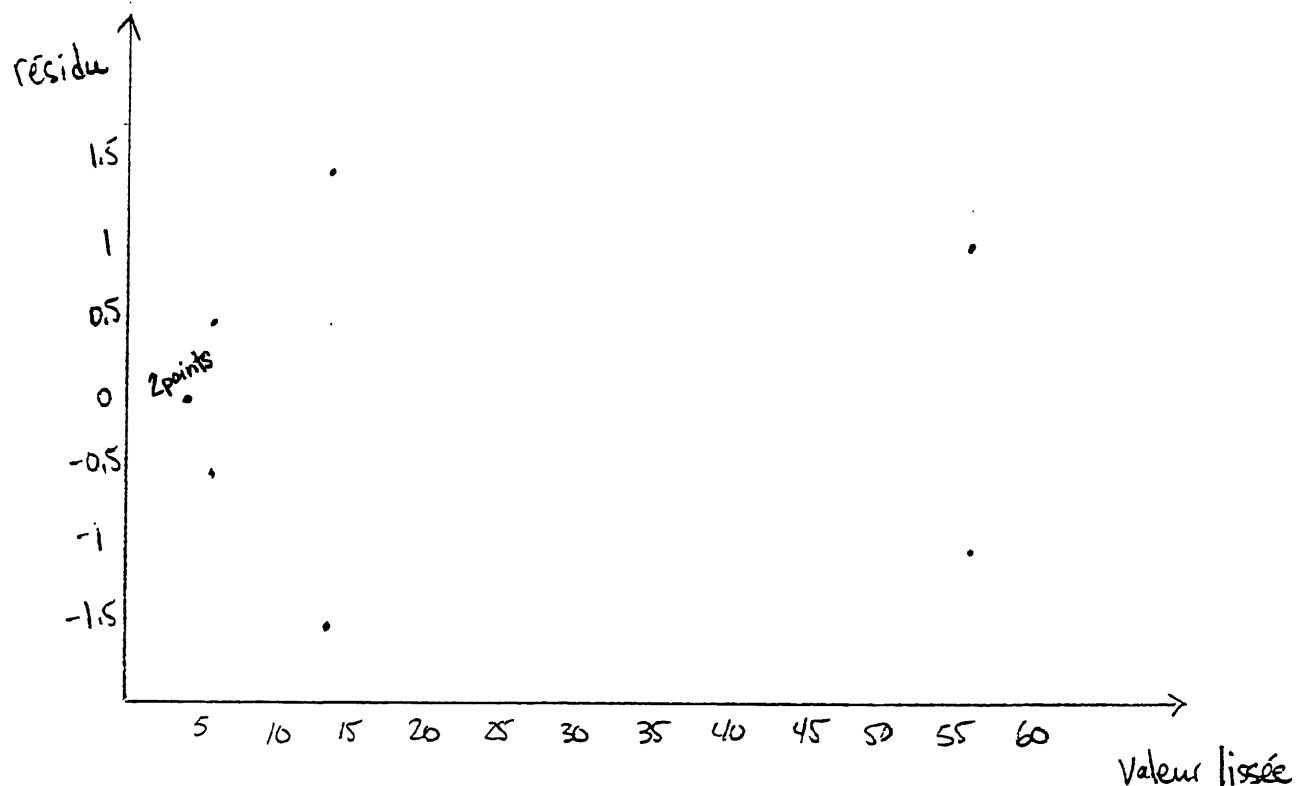




Vale - resíduos  
Figure 8.2

Figure B.3

valeur lissée vs résidu -  $V_e b_e$



valeur lissée vs résidu - Perméabilité transformée

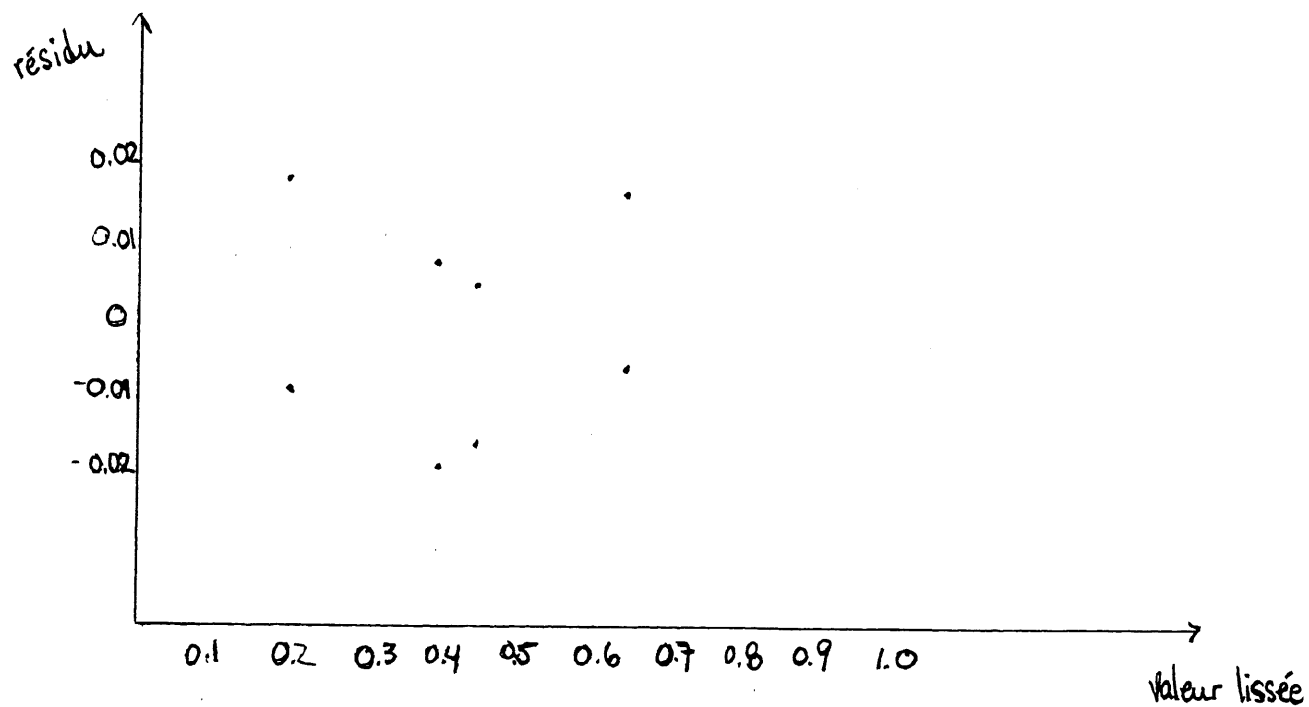
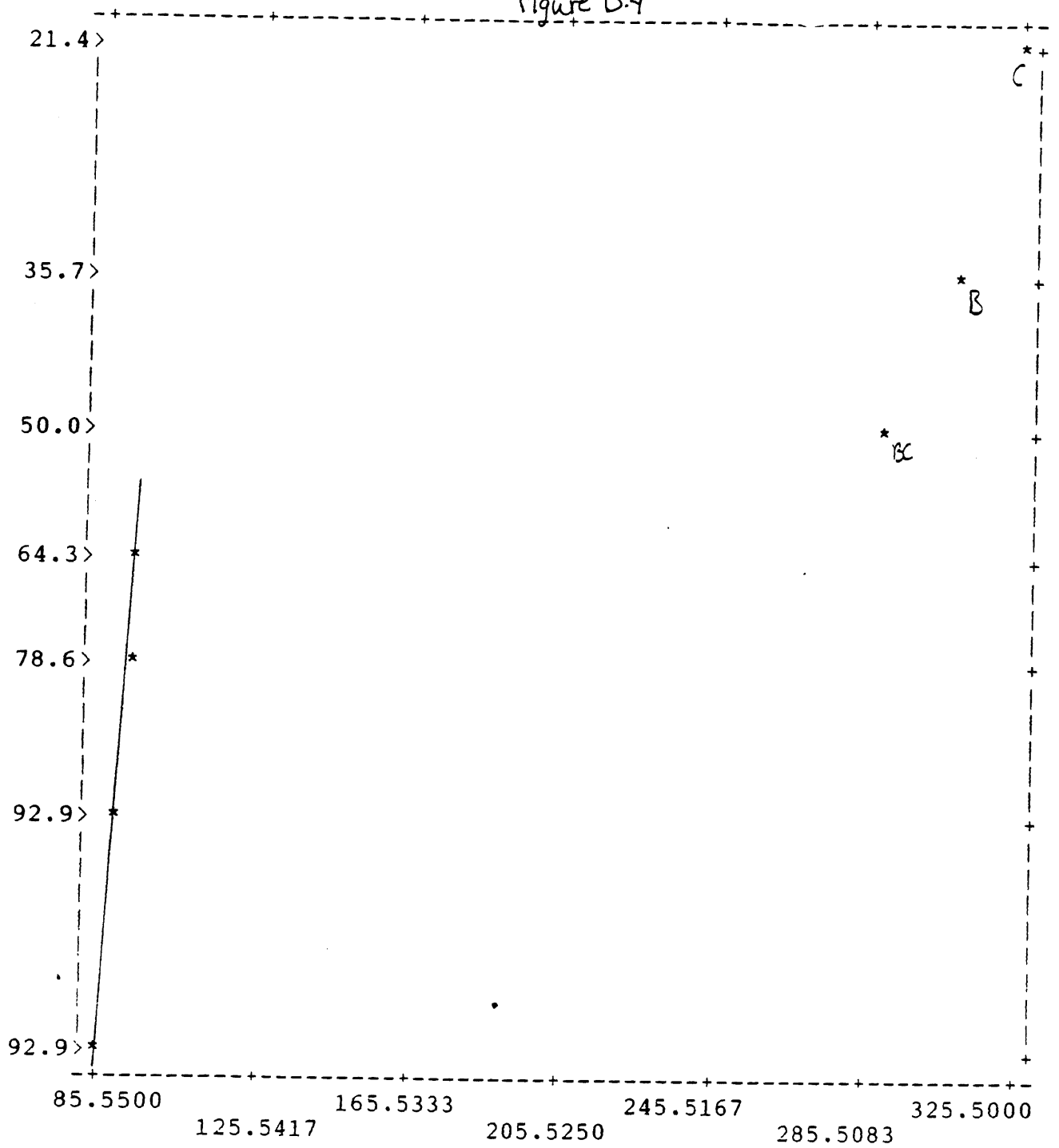
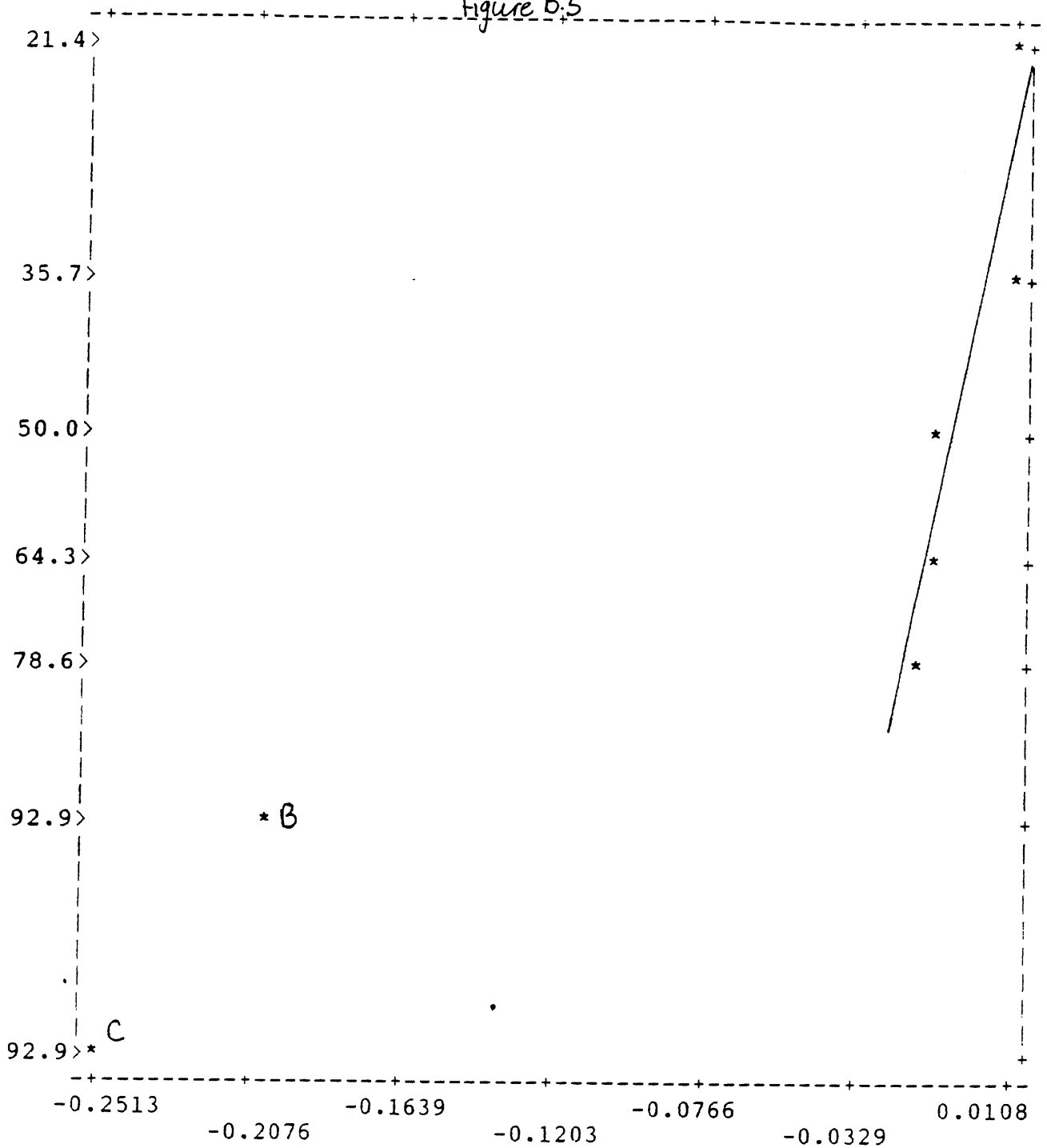


figure B.4

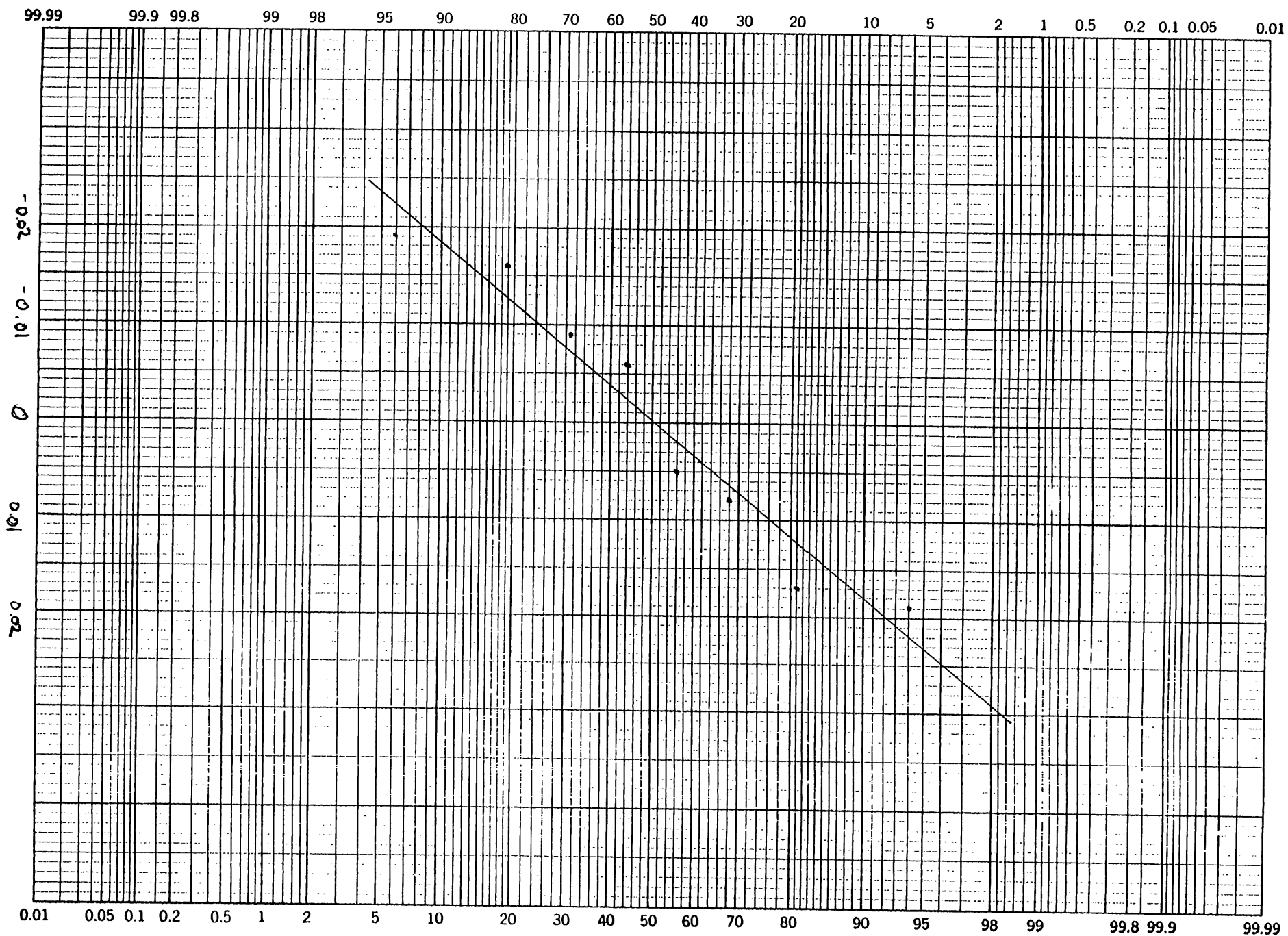


obs	Perm	effperm		SS
1	5.9	85.55	A	14 637.606
2	5.1	309	B	19 0962
3	29	91.95	AB	16 909.604
4	24	325.5	C	211900.500
5	49	88.45	AC	15 646.804
6	37	288	BC	16 5888
7	460	94.05	ABC	17 690.807
8	820			

Figure B.5



OBS	perm2	effperm2	SS
1	0.642	0.011 A	$231.125 \times 10^{-6}$
2	0.665	-0.201 B	$81003.125 \times 10^{-6}$
3	0.431	-0.014 AB	$406.125 \times 10^{-6}$
4	0.452	-0.251 C	$126253.125 \times 10^{-6}$
5	0.378	-0.011 AC	$253.125 \times 10^{-6}$
6	0.405	0.011 BC	$231.125 \times 10^{-6}$
7	0.215	-0.013 ABC	$351.125 \times 10^{-6}$
8	0.187	-	

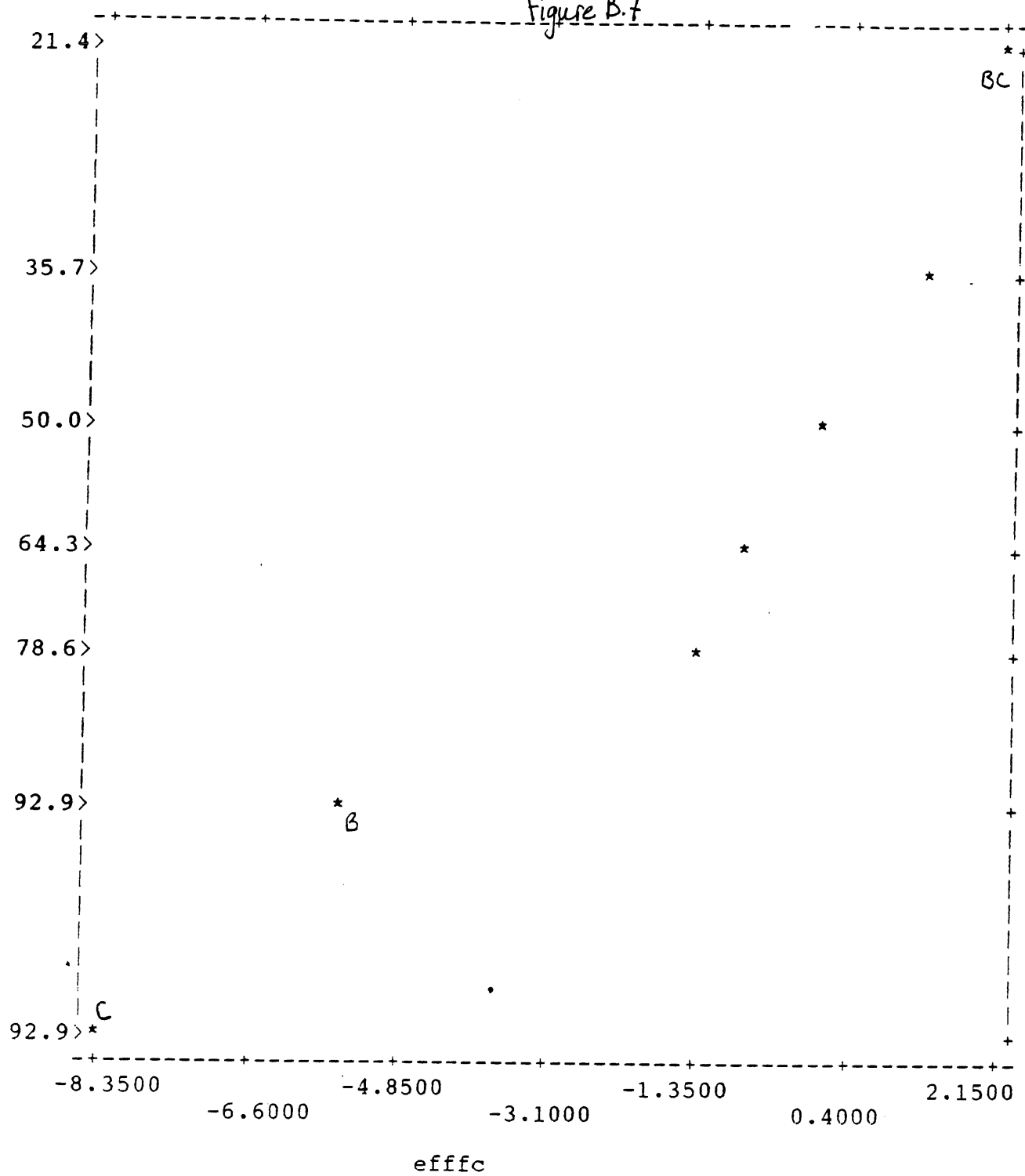


perm 2 - réviduo

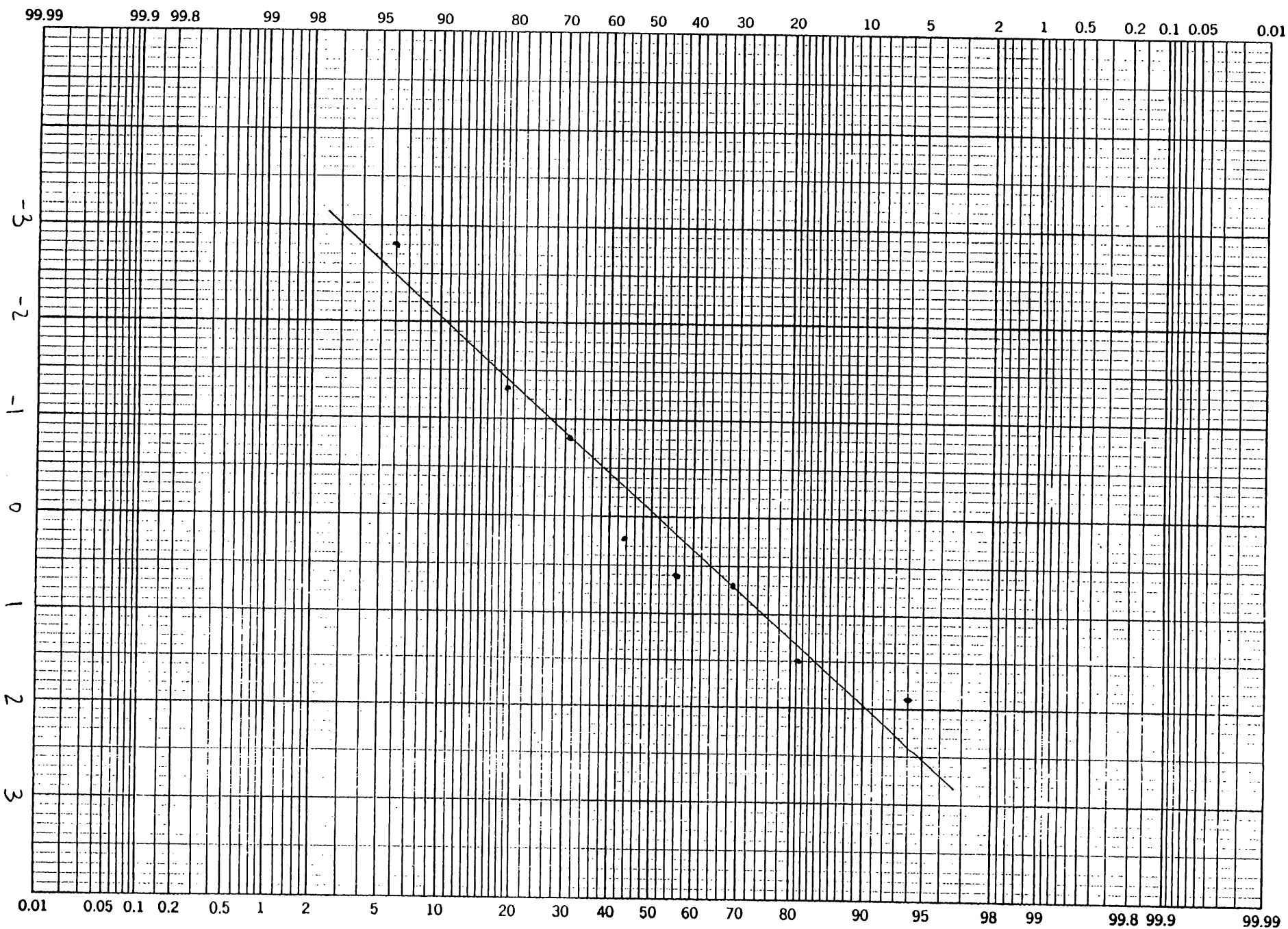
figure B.6

103

Figure B.7



obs	$f_c$	efffc		SS
1	19.5	-0.8	A	1.28
2	21.2	-5.55	B	61.605
3	12.9	0.1	AB	0.02
4	12.4	-8.35	C	139.445
5	11.6	-1.4	AC	3.92
6	8.1	2.15	BC	9.425
7	6.9	1.2	ABC	2.88
8	6.0			



$f_c$  - Résidus

Figure B.8

figure B.9

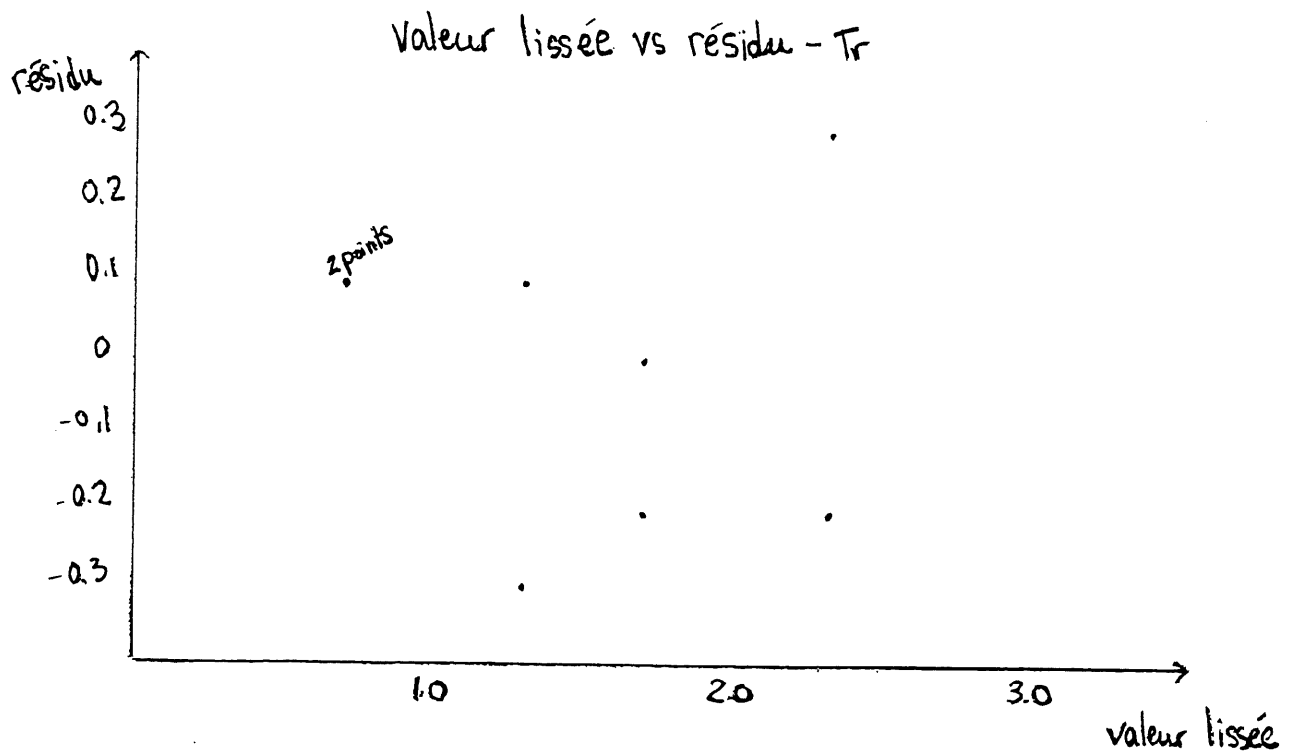
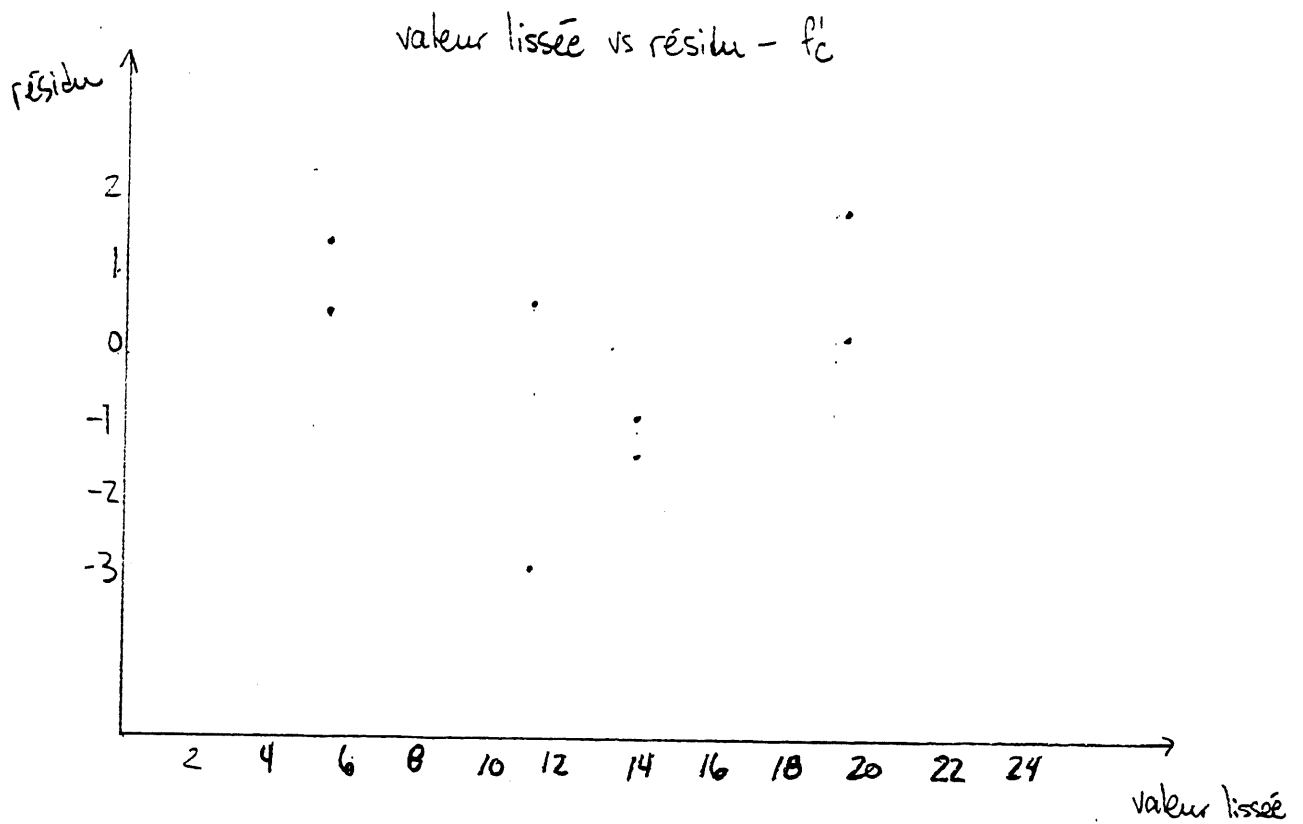
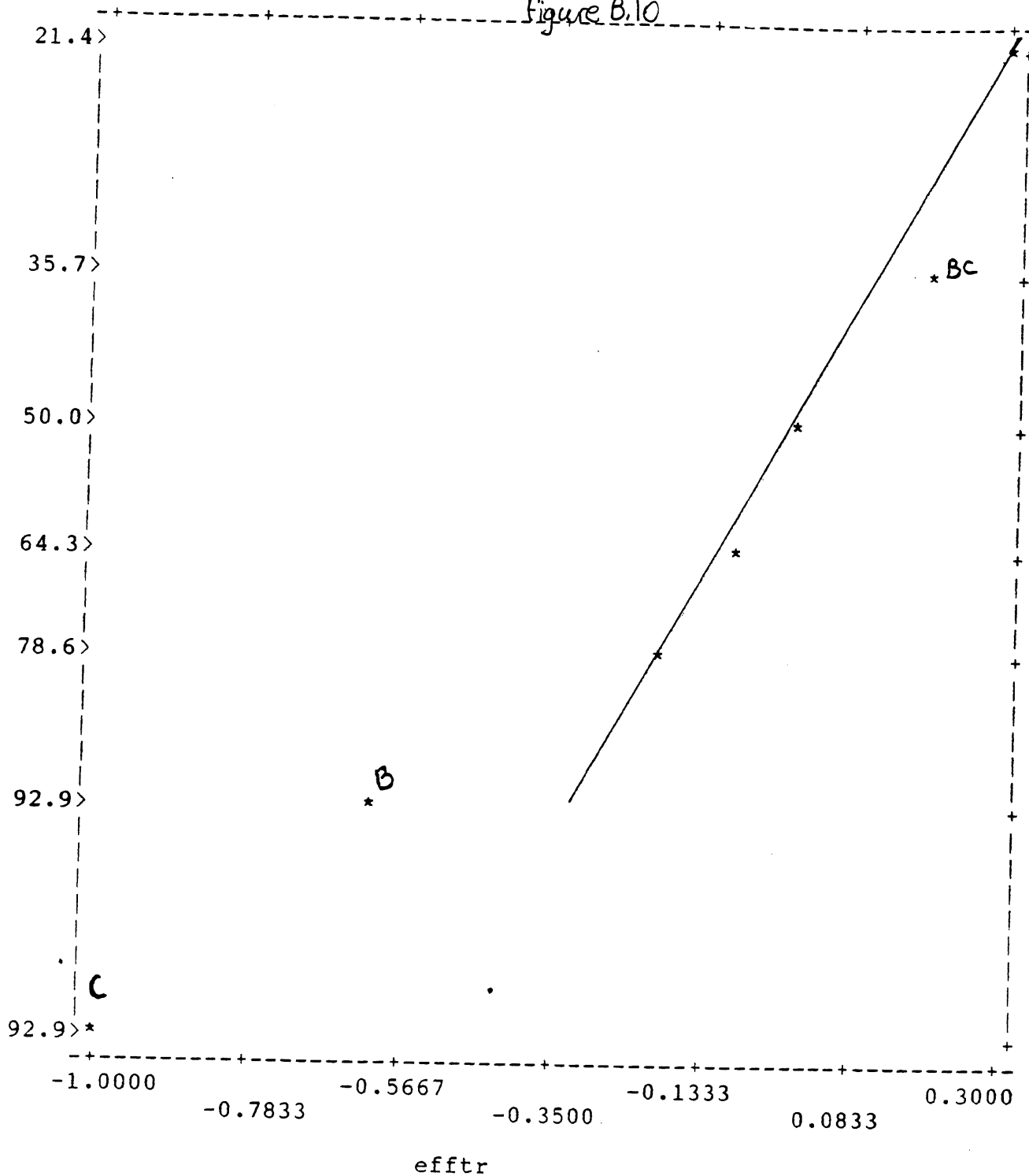
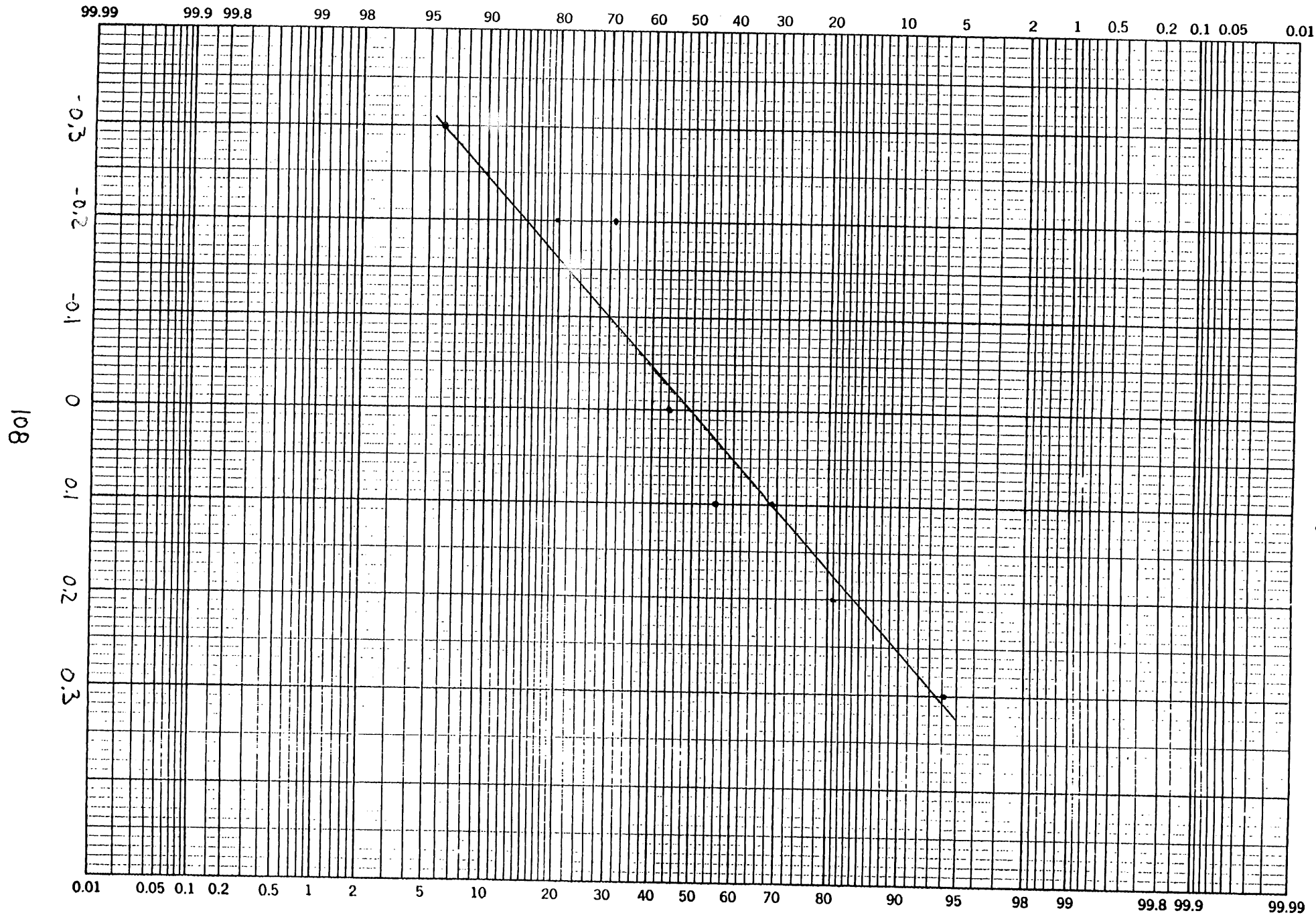




Figure B.10



obs	Tr	efftr		SS
1	2.1	0	A	0
2	2.7	-0.6	B	0.72
3	1.7	-0.1	AB	0.02
4	1.5	-1	C	2.0
5	1.4	-0.2	AC	0.08
6	1.0	0.2	BC	0.08
7	0.8	0.3	ABC	0.18
8	0.8			



$T - \bar{x}$   
figure B.11